

Sin tecnicismos, pero con el rigor que le caracteriza, Eric Chaisson describe y analiza sus tres pilares científicos fundamentales: el origen de la materia, la aparición de la vida y el posible futuro.
Haciendo un recorrido de quince mil millones de años, el autor agrupa los resultados o las conclusiones a las que han llegado todas las ciencias actuales (física, biología, antropología, geología, etc.). De este modo confluyen los elementos que culminan en el desarrollo del hombre, que tiene en sus manos el destino del planeta en que vive. Llegado a este punto, el autor no oculta las aprensiones que provoca cualquier pronóstico sobre el futuro. No obstante, el autor presiente "el amanecer de una segunda gran era cósmica".

Eric Chaisson es profesor en la Universidad de Harvard y miembro permanente del Harvard-Smithsonian Center para Astrofísica de Cambridge, Massachusetts. Ha dirigido importantes investigaciones sobre la Vía Láctea, en especial la formación de estrellas en el espacio interestelar, y la búsqueda de inteligencia extraterrestre en la Galaxia.

El amanecer cósmico

E. Chaisson

72





El amanecer cósmico

Orígenes de la materia y la vida

Eric Chaisson

Biblioteca Científica Salvat




BRIAN SMITH





El amanecer cósmico

Biblioteca
Científica
Salvat

El amanecer cósmico

Orígenes de la materia y la vida

Eric Chaisson

SALVAT

Versión española de la obra original en inglés *Cosmic Dawn*,
de Eric Chaisson

Traducción: Pilar Giralt
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8952-4 (Volumen 72)
Depósito Legal: B-37488-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Noviembre 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

A nuestros padres

PREFACIO

«No hay nada permanente excepto el cambio.»

HERÁCLITO

Cuando los antecesores de nuestra civilización empezaron a adquirir conciencia de las cosas, hombres y mujeres percibieron dos de ellas: se fijaron en sí mismos y se fijaron en su entorno. Se preguntaron quiénes eran y de dónde venían. Desearon comprender los puntos luminosos que tachonaban el cielo nocturno, los animales y plantas que les rodeaban y el aire, los ríos y las montañas. Meditaron sobre su propio origen y su propio destino.

Hace miles de años, todos estos interrogantes básicos fueron tratados como secundarios, ya que el interés primordial parecía muy claro: se daba por sentado que la Tierra era el centro del Universo. Después de todo, el Sol, la Luna y las estrellas daban la impresión de girar alrededor de nuestro planeta. Cuando no se sabía nada en contra, era natural llegar a la conclusión de que el planeta y sus habitantes eran especiales. Este centralismo condujo a un sentimiento de seguridad, o al menos de complacencia... a la convicción de que el origen, el funcionamiento y el destino del Universo eran gobernados por algo superior a lo natural, algo sobrenatural.

En realidad, nuestros antepasados se dedicaron a un estudio intensivo, y sus esfuerzos obtuvieron resultados tan notables como los mitos, la religión y la filosofía.

La idea del centralismo de la Tierra y la fe en seres sobrenaturales no desaparecieron hasta hace pocos siglos. Durante el Renacimiento, los humanos empezaron a pensar con mayor exigencia en sí mismos y en el Universo. Comprendieron que ya no era suficiente

meditar sobre la naturaleza; también era necesario observarla. Los experimentos se convirtieron en parte central del proceso de investigación. Para que fueran efectivas, las hipótesis tenían que probarse experimentalmente, a fin de perfeccionarlas si el experimento era positivo, o rechazarlas en caso contrario. Había nacido el método científico, probablemente la técnica más poderosa jamás concebida para el desarrollo de la información de los hechos. La ciencia moderna había hecho su aparición.

En la actualidad, todos los físicos y biólogos del mundo utilizan el método científico. En general, reúnen una serie de datos, luego forman una hipótesis, y por último someten a prueba dicha hipótesis. Tal es el sistema de investigación racional empleado para formular la descripción de todos los fenómenos naturales. Aplicado debidamente, el método científico permite llegar a una conclusión libre de cualquier punto de vista subjetivo. Su propósito es facilitar un consenso estrictamente objetivo sobre los numerosos aspectos de nuestro Universo.

Los interrogantes son los mismos de la Antigüedad. Seguimos preguntándonos acerca de las mismas cuestiones fundamentales: ¿Quiénes somos? ¿De dónde venimos? ¿Cuál es nuestro origen y nuestro destino? Pero en nuestros intentos de responder a ellas disponemos ahora de las herramientas de la tecnología moderna: telescopios para mejorar nuestra visión del Universo macroscópico de planetas, estrellas y agrupaciones aún mayores llamadas galaxias; microscopios que nos ayudan a ver mejor el mundo microscópico de células, moléculas y entidades todavía menores llamadas átomos; aceleradores de alta potencia que penetran en el dominio subatómico de núcleos, electrones y unidades incluso más elementales llamadas partículas; naves espaciales que recogen datos inasequibles para nosotros desde la Tierra; y sofisticadas computadoras que absorben la afluencia enormemente incrementada de nuevos datos, hipótesis y pruebas experimentales.

Vivimos en una era de tecnología. Y aunque ésta amenace con ser nuestra perdición, no cabe duda de que en la actualidad nos proporciona una visión excepcionalmente rica de nosotros mismos y del Universo.

Entre todos los logros científicos alcanzados desde el Renacimiento, un descubrimiento destaca con más fuerza que los demás: nuestro planeta no es el centro ni es especial. La aplicación del método científico ha demostrado que, como seres vivientes, no habitamos ni mucho menos un lugar único en el Universo. La investigación, en especial la de las últimas décadas, sugiere con claridad que vivimos en lo que parece ser una roca común llamada Tierra, planeta que gira alrededor de una estrella común llamada Sol, situada en los suburbios de una agrupación mucho mayor denominada Vía Láctea, una galaxia entre un sinnúmero de miles de millones de otras galaxias distribuidas por el observable abismo que llamamos el Universo.

En estas últimas décadas del siglo XX, la ciencia experimental está ayudando a desentrañar los detalles de este inmenso panorama. Empezamos a darnos cuenta de que todos los cuerpos —de los quarks a los quasars, de las galaxias a los seres humanos —están emparentados entre sí. Intentamos comprender el guión de la evolución cósmica: la grandiosa síntesis de una larga serie de graduales alteraciones de la materia, producidas en un espacio y un tiempo casi inimaginables, que han creado nuestra galaxia, nuestro Sol, nuestro planeta, y a nosotros mismos.

La ciencia moderna estipula que el distintivo de toda evolución ha sido un cambio constante. Los investigadores tienen ahora una idea razonablemente exacta no sólo de cómo nacieron y murieron innumerables estrellas a fin de crear la materia que compone nuestro mundo, sino también de la aparición de la vida como una consecuencia natural de la evolución de la materia. Ahora existen indicios claros de un vínculo entre la evolución de simples átomos en galaxias y estrellas, la evolución de estrellas en elementos pesados, la evolución de estos elementos en los bloques moleculares de la vida, y la de estas moléculas en la propia vida, la de esta vida en inteligencia y la de la vida inteligente en una civilización cultural y tecnológica.

Para contestar las preguntas fundamentales: ¿Quiénes somos? y ¿de dónde venimos?, es necesario remontarse al pasado, más allá de los setenta años de una vida humana media, más allá del inicio de la ciencia moderna hace varios siglos, más allá del principio del lenguaje y la civilización hace decenas de miles de años, más allá de nuestros antepasados antropoides, que salieron de la selva hace varios millones de años, e incluso más allá del tiempo en que la vida multicelular empezó a multiplicarse en nuestro planeta hará unos mil millones de años —unos diez megasiglos antes de ahora.

Para apreciar la evolución cósmica debemos ampliar nuestros horizontes, ensanchar nuestras mentes e imaginar los acontecimientos del más remoto pasado. Debemos retroceder en el tiempo, retroceder, por ejemplo, cinco mil millones de años, cuando no existía vida en el planeta Tierra. ¿Por qué? Porque la Tierra no existía, como tampoco existía el Sol ni el Sistema Solar. Estos cuerpos aún se estaban formando de una nube de gas arremolinada al borde de una vasta galaxia de estrellas más viejas que había existido en una u otra forma desde muchísimo tiempo antes.

Actualmente, la ciencia moderna combina una gran variedad de disciplinas —astronomía, física, química, biología, geología,

antropología, fisiología y sociología entre otras— en un esfuerzo interdisciplinario para resolver los dos problemas fundamentales: el origen de la materia y el origen de la vida. Si podemos comprender el guión de la evolución cósmica, tal vez seamos capaces de determinar con exactitud quiénes somos, cómo se originó específicamente la vida en este planeta e incluso cómo evolucionaron de manera tan increíble los organismos vivos hasta el punto de invadir la tierra, inventar la lengua, crear la cultura, idear la ciencia, explorar el espacio e incluso estudiarse a sí mismos.

Este libro se refiere a todas estas cosas: espacio y tiempo, materia y vida. Exploramos nuestro Universo, nuestro planeta y a nosotros mismos. Resumimos la posición actual de la ciencia en relación con las respuestas a algunas de las preguntas filosóficas tradicionales: ¿Quiénes somos? ¿De dónde venimos? ¿Qué relación nos une, como seres vivos, al resto del Universo? ¿Qué probable porvenir nos espera como seres inteligentes? En suma, ¿cuál es nuestro origen y nuestro destino? ¿Cuál es el origen y el destino de la Tierra, del Sol y del Universo?

Escrito para personas eclécticas interesadas en la naturaleza, este libro explica la ciencia contemporánea válida sin emplear términos técnicos. Pese a ello, no se ha sacrificado la exactitud, y se ha llegado en cambio hasta las mismas fronteras de la ciencia. Los lectores reconocerán que las respuestas a las preguntas fundamentales mencionadas no son todavía de una claridad meridiana. Los mejores científicos son a menudo incapaces de facilitar soluciones precisas y detalladas para las profundas cuestiones que nos ocupan.

Hasta las últimas décadas no hemos podido disponer de las herramientas tecnológicas necesarias para transferir estos interrogantes del reino de la filosofía al de la ciencia. Los investigadores están descubriendo que el filo del conocimiento se parece más a una línea difusa que a un verdadero límite. La razón estriba en que el panorama científico está cambiando a un ritmo trepidante, en que se están adquiriendo nuevos conocimientos con profusión inaudita y en que hay que aventurar nuevas hipótesis interdisciplinarias para enderezar dicho panorama. Por añadidura, gran parte de estos conocimientos afectan a la condición humana. Podríamos decir con justicia que de momento sólo poseemos un boceto de las respuestas a las preguntas fundamentales, un boceto que adolece todavía de muchas lagunas.

Así pues, vamos a explorar aquí, de un modo descriptivo e ilustrativo, la íntima naturaleza del Universo. Estas páginas reflejan el criterio científico actual de que los átomos de nuestros cuerpos

están emparentados con el Universo en general. Explican el punto de vista actual sobre él, el de la evolución cósmica —un cuadro realmente grandioso, una cosmogénesis, un materialismo dialéctico—, de acuerdo con el cual unos cambios graduales en la composición y la estructura de la materia han dado origen a las galaxias, las estrellas, los planetas y la vida. Tratan de sintetizar los ingredientes esenciales de la astrofísica y la bioquímica, porque estas dos ciencias



están causando, más que ninguna otra, un impacto enorme en nuestro concepto filosófico de nosotros mismos y de nuestro lugar en el Universo.

En resumen, este libro presenta la visión más amplia del más enorme de los panoramas. Analiza, empleando lo mejor que la ciencia nos brinda, las cuestiones más fundamentales; quizá no sean las que interesen más a los pueblos del siglo XX, pero sí son las más fundamentales. Este libro ofrece una valoración de nuestra rica herencia universal. Intenta desentrañar la naturaleza y el comportamiento de la radiación, la materia y la vida a la escala más grandiosa que existe, descifra la estructura de la naturaleza y descubre que la tecnología se encuentra ahora en el amanecer de una era totalmente nueva.

Con objeto de que el guión de la evolución cósmica sea más ameno para el público en general, he evitado referirme en el texto a las diversas fuentes. Citar a cada uno de los especialistas redundaría en menoscabo de los conceptos generales enunciados a lo largo de todo el libro. No obstante, el lector debe tener en cuenta que los conocimientos descritos aquí fueron descubiertos por legiones de investigadores consagrados al trabajo en todo el espectro de las ciencias humanas.

Mi mejor ayuda en esta empresa ha sido mi esposa Lola, autora de todas las ilustraciones de este libro. Su modo de combinar aspectos de la materia y la vida en forma artística ha sido para mí una fuente de considerable inspiración.

Agradezco a George Field, director del Harvard-Smithsonian Center para Astrofísica, su invitación a impartir con él un curso interdisciplinario sobre el tema de la evolución cósmica a estudiantes de las universidades de Harvard y Radcliffe. La profunda curiosidad de los estudiantes por saber más acerca de nuestras raíces cósmicas me ayudó a cristalizar mis pensamientos sobre la gran síntesis esbozada aquí.

Peter Davison, mi editor de la Atlantic Monthly Press, contribuyó a la claridad del manuscrito y fue una gran ayuda para un escritor novel que intentaba explorar los laberintos del mundo editorial.

Mark Stier y Ann Najarian hicieron comentarios útiles sobre una versión anterior del manuscrito.

Sin embargo, ninguno de estos agradecimientos implica necesariamente la conformidad de las personas mencionadas con los temas centrales que he querido resaltar en esta historia universal.

ERIC J. CHAISSON
Winchester, Massachusetts

PRÓLOGO

EL GRAN PANORAMA

La exploración de todo el Universo requiere pensamientos amplios, y los de mayor alcance son los cosmológicos. La cosmología es el estudio del origen, la evolución y el destino de ese conglomerado de toda la materia y toda la energía conocido como el Universo. Aquí trataremos de hacer una valoración de algunas propiedades del Universo: su tamaño, forma y estructura actuales.

Hay que dar a las consideraciones cósmicas una perspectiva apropiada. Al examinar las dimensiones del Universo, los elementos menores como planetas y estrellas — incluso galaxias, hasta cierto punto — resultan insignificantes. Los cosmólogos atribuyen a los planetas una importancia desdeñable, y consideran a las estrellas como simples fuentes de consumición de hidrógeno, y a las galaxias como meros detalles en el grandioso contexto del espacio.

El tiempo también pierde importancia comparado con la eternidad. Un intervalo de un millón de años equivale a un parpadeo en la escala cósmica. Incluso mil millones de años son un período breve en el contexto del tiempo ilimitado.

Para comprender la cosmología hemos de ampliar nuestro punto de mira hasta abarcar todo el espacio y todo el tiempo. Si alguna vez hemos deseado ensanchar nuestros horizontes, ¡éste es el momento de hacerlo!

Para empezar, tomemos nota: se puede decir con facilidad que hay miles, millones e incluso billones de cosas; pero esto no sólo implica cifras enormes, sino que las diferencias entre ellas son también muy grandes. Por ejemplo, comprender el significado de un millar parece bastante fácil: a razón de un número por segundo, podríamos contar hasta mil en unos quince minutos. Sin embargo, llegar a un millón requiere unas dos semanas, contando a razón de un número por segundo durante dieciséis horas diarias (reservando ocho horas para dormir). Contar hasta

mil millones, al ritmo de un número por segundo y durante dieciséis horas al día, requeriría una vida entera. ¡Toda una vida para contar hasta mil millones! Y sin embargo, aquí hablaremos rutinariamente de intervalos de tiempo que abarcarán millones y miles de millones, no sólo de segundos, sino también de años. Y trataremos de cuerpos integrados por millones de átomos, incluso por miles de millones de estrellas. De ahí que debamos acostumbrarnos a cifras colosales, a enormes intervalos de espacio y a períodos de tiempo extremadamente dilatados, y reconocer en particular que si un millón es mucho más que mil, mil millones es una cifra aún más respetable.

Al contemplar el Universo desde el Tierra, distinguimos una gran variedad de cuerpos. Vemos entre ellos nebulosas de gas que brillan con polícroma luz, estrellas eruptivas que expulsan materia y energía, y poderosas galaxias que parpadean en las profundidades del espacio. Observados por medio de un telescopio y en una noche sin luna cada uno de estos cuerpos constituye un soberbio ejemplo de arquitectura astronómica, una verdadera joya de la noche. Pero los cuerpos astronómicos son algo más que obras de arte, algo más que exponentes de la más pura elegancia. Planetas, estrellas, nebulosas, novas, galaxias, quasars y todo el resto son de importancia vital si tenemos en cuenta nuestro lugar en este gran panorama. Cada uno de esos grupos es una fuente de información sobre los aspectos materiales de nuestro Universo.

La luz es sólo un tipo de radiación. Las ondas de radio, infrarrojas, ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma contienen una radiación invisible. Pero independientemente del tipo, la radiación es energía. También es información, una información extraordinariamente rudimentaria, y pese a ello, sólo mediante este flujo de información unilateral podemos recrear las profundidades del espacio.

Los astrofísicos obtienen información sobre objetos cósmicos interpretando la radiación que emiten. Decimos «astrofísica» porque esta palabra define mejor que cualquier otra la base sobre la que se hace la interpretación. El énfasis se presta a la física; *astro* es un mero prefijo. Hoy, el científico espacial que carezca de unos sólidos conocimientos de física no puede llamarse científico espacial. Pasaron los días en que los astrónomos realizaban descubrimientos fundamentales mirando por el telescopio y admirando el espectáculo. El astrofísico moderno quiere saber algo más que el lugar donde se encuentran los cuerpos celestes, o la clase de su brillo y color. Necesitamos percibir *aquello* que queda fuera de alcance de nuestra vista. Queremos comprender *cómo* llegaron hasta allí esas miríadas de objetos, *cómo* actúan y en especial *cómo* se afectan mutuamente la materia y la radiación. En resumen, los astrofísicos aspiran a comprender el origen, la evolución y el destino de todo cuanto existe más allá del planeta Tierra.

Hay una diferencia esencial entre la mayoría de científicos que estudian la materia terrestre en un laboratorio de la Tierra, y los astrofísicos que investigan la materia extraterrestre que se encuentra lejos de nuestro planeta.

En la Tierra, los científicos pueden encaminar sus experimentos hacia el descubrimiento de las propiedades de todo tipo de materia terrestre. Pueden ejercer este control manipulando la materia que está bajo examen o empleando técnicas experimentales para inspeccionarla. Consideremos, por ejemplo, un intento de descubrir las propiedades de un nuevo mineral de roca. Los científicos de laboratorio podrían utilizar una serie de muestras de roca, cada una de forma y tamaño diferente. Podrían alterar la orientación de las rocas dentro del aparato del laboratorio. Podrían calentar el metal o enfriarlo crioscópicamente, o incluso someterlo a diferentes intensidades de electricidad y magnetismo. Por todo ello, los investigadores podrían aprender mucho sobre el mineral, ya que ahora conocerían sus reacciones a los cambios ambientales. En suma, el ambiente en que se lleva a cabo un experimento terrestre puede ser alterado o manipulado para estudiar más a fondo cualquier muestra de materia local.

La materia que se halla lejos de nuestro planeta, por el contrario, no puede ser manejada ni siquiera con las mejores herramientas de la civilización moderna. Los remotos ambientes extraterrestres no pueden ser controlados ni manipulados. Los astrofísicos tienen que limitarse a trabajar con radiaciones intangibles emitidas por materia extraterrestre, radiaciones que a veces pueden ser interceptadas por la imaginación o detectadas por instrumentos de la Tierra; señales captadas momentáneamente mientras viajan desde cuerpos distantes hacia las más remotas regiones del Universo.

Los avances tecnológicos han permitido recientemente, claro está, algunas excepciones de lo expuesto más arriba ofreciendo a los científicos espaciales la posibilidad de realizar experimentos controlados con algunos especímenes de material extraterrestre: meteoritos interplanetarios descubiertos en la capa exterior de la Tierra, en especial en las heladas regiones polares; rocas lunares recogidas en nuestro muerto satélite gracias a los programas espaciales norteamericano y ruso; y suelo marciano examinado por un par de naves no tripuladas que ahora se encuentran en

las llanuras de aquel rojizo planeta. Pero es probable que pasen muchos siglos antes de que nuestros descendientes sean capaces de realizar exploraciones *in situ* de materia exterior al sistema planetario ya conocido por todos. Porque ahora hay que hacer el inventario y analizar la materia universal, extrayendo la información oculta dentro de su radiación naturalmente emitida y capturada por nuestros telescopios de la Tierra o sus alrededores.

Detalles aparte, la radiación es el único medio por el que conocemos la existencia de cuerpos celestes.

Existe otra restricción en el estudio de materia extraterrestre lejana. No sólo nos resulta imposible contemplar los cuerpos celestes en su propio lugar del espacio, sino que tampoco podemos examinarlos en el tiempo presente. ¿Por qué? Porque la radiación no viaja a una velocidad ilimitada, sino a la velocidad de la luz. En consecuencia, se requiere tiempo —a veces muchísimo tiempo— para que la luz o cualquier tipo de radiación recorra las extensiones de espacio inimaginablemente vastas que separan a los cuerpos en el Universo.

Consideremos como ejemplo a la estrella más cercana (exceptuando al Sol), llamada Próxima Centauri, miembro del triple sistema estelar de *Alfa Centauri.* Pese al adjetivo *más cercana*, esta estrella se halla a poco más de cuatro años luz de distancia: y un año luz es una inmensa distancia cuando pensamos que se trata de la recorrida por la luz en un año entero a la máxima velocidad conocida.

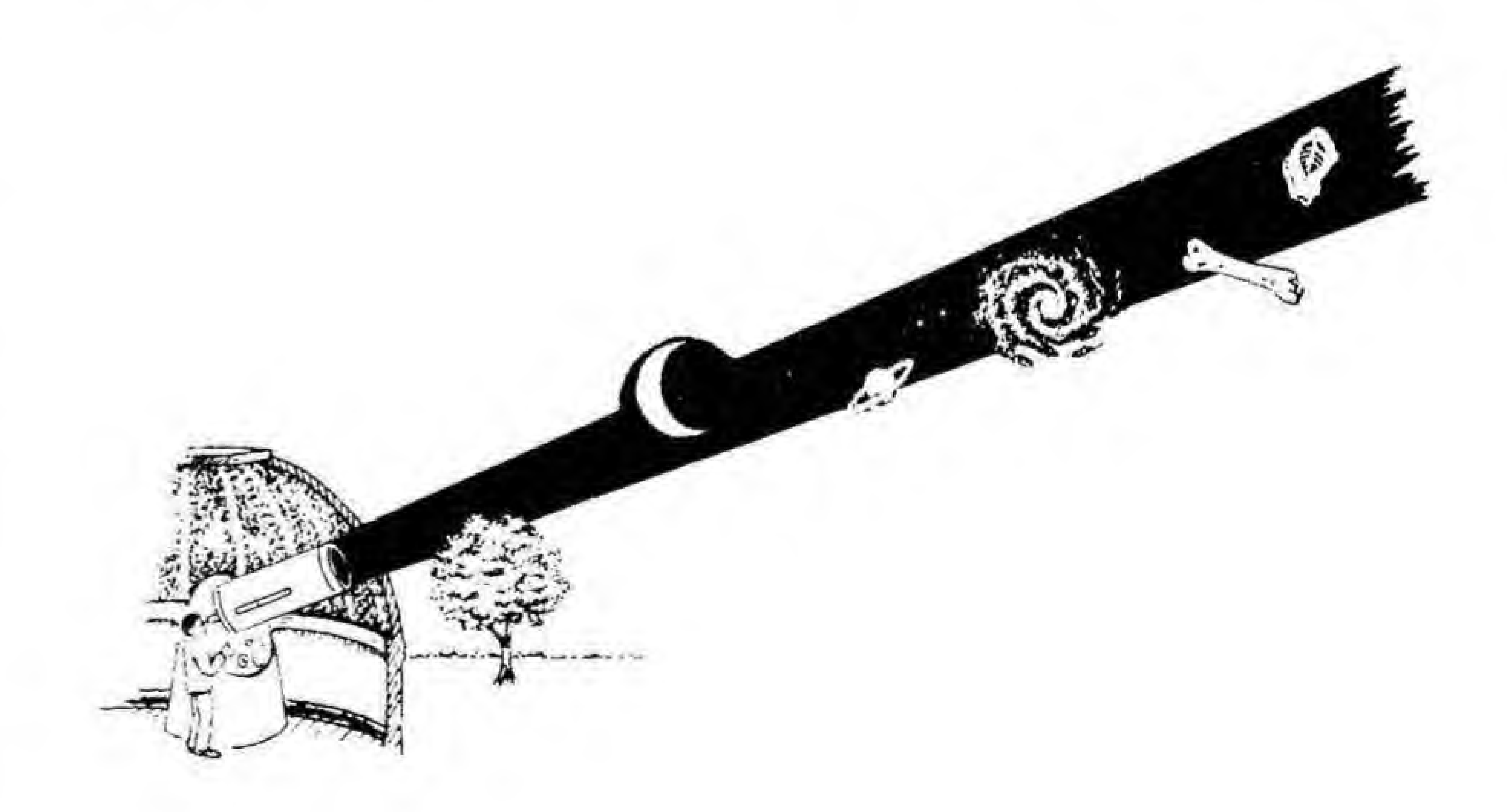
Así pues, un año luz es toda una distancia. Casi alcanza los diez billones de kilómetros, o sea que la luz o cualquier otro tipo de radiación viaja diariamente unos veintiséis mil millones de kilómetros. Esto es velocidad, no cabe duda. Pero el sistema de *Alfa Centauri* no está a un solo año luz de nosotros, sino a varios años luz. Por consiguiente, la radiación tarda varios años en viajar desde dicho sistema estelar hasta la Tierra. Como nada puede superar la velocidad de la luz, la radiación de *Alfa Centauri* no puede llegarnos más de prisa. Expresado de otra manera, la luz que vemos cuando miramos ahora a *Alfa Centauri* abandonó la estrella hace varios años y ha estado viajando desde entonces por el quasi vacío del espacio exterior.

La radiación de objetos distantes contiene, por lo tanto, claves de su pasado. Cuanto más lejos se halla un cuerpo de la Tierra, tanto más tarda su luz en llegar hasta nosotros. La radiación emitida por las galaxias más cercanas, situadas a millones de años luz de distancia, abandonó dichos cuerpos antes de que el *Homo sapiens* surgiera como parte de la familia animal del planeta Tierra. La radiación observada en galaxias verdaderamente remotas las dejó mucho antes de que la Tierra se formara. De hecho, la radiación que llega ahora a la Tierra desde los objetos cósmicos más distantes fue generada en las más tempranas épocas del Universo, cuando aún no había planetas ni estrellas ni Vía Láctea.

Estudiando la radiación, los astrofísicos pueden descubrir las condiciones reinantes en los cuerpos remotos cuando éstos emitieron su luz. Al descifrar dicha radiación, sólo podemos imaginar las condiciones generales del Universo antes de la creación del Sol y la Tierra, pero podemos especificar el valor de los dos factores más importantes — temperatura y densidad— que caracterizaban al Universo en aquellos primitivos tiempos.

Nuestra perspectiva del Universo es retardada; lo vemos como era, no como es.

Los astrofísicos, por lo tanto, son los historiadores del Universo. Mirándolo desde la Tierra, reconstruimos su historia. Los telescopios son nuestras máquinas del tiempo, son herramientas que nos permiten investigar fases anteriores del Universo, incluyendo aspectos de nuestros orígenes. Como los arqueólogos, que excavan en las ruinas para hallar vestigios del origen y la evolución de antiguas culturas, los astrofísicos interpretan la radiación en busca de claves sobre el origen y la evolución de la materia.



Así pues, no lo olvidemos nunca: *observar el espacio equivale a mirar atrás en el tiempo.* Con el examen de las profundidades del espacio y de la radiación de los cuerpos más distantes, los investigadores esperan obtener una imagen de cómo era el Universo hace muchísimo tiempo, cerca de su origen. Tal es el trabajo que nos espera.

La actividad cósmica impregna nuestro Universo. La inmovilidad también. Y es la distancia lo que decide cuál de las dos domina. Examinados superficialmente, los cuerpos astronómicos suelen parecer estables, pero una mayor atención revela a menudo cierto grado de violencia. En general, cuanto mayor es la distancia, tanto más estables parecen. Por ejemplo, el hecho de que la Tierra sea convulsionada por seísmos y erupciones volcánicas es obvio para quienes viven en ella y presencian de cerca su actividad cotidiana; pero nuestro planeta aparece tranquilo visto de lejos en las notables fotografías del ORTO de la Tierra desde la Luna tomadas por los astronautas del Apolo. De modo similar, si observamos a nuestro Sol a través de un telescopio, éste aparece salpicado de radiantes fulgores, manchas oscuras y explosiones superficiales, como seguramente ocurre en todas las estrellas; y, sin embargo, a simple vista, el Sol y la mayoría de estrellas tienen un aspecto sereno y reposado.

Sería de esperar que, pese a algún foco de violencia distribuido aquí y allí por todo el Universo, el mayor alejamiento posible proporcionaría una imagen de perfecta inmovilidad. Pero no es así. En general, el Universo no es sereno ni estable. Resulta sorprendente, pero todo el Universo en su conjunto da muestras de una considerable actividad.

Una vez comprendido el hecho de este vigor del Universo, tal vez sería de esperar que las aglomeraciones materiales de mayor tamaño —entre ellas las galaxias— realizaran movimientos casuales y desordenados, precipitándose en una y otra dirección. Quizás imaginemos los caóticos movimientos de unas luciérnagas atrapadas en un frasco, o incluso la turbulenta movilidad de los guisantes en una olla de agua hirviendo. Pero estas analogías no sirven para el Universo. Las galaxias no se mueven de manera caótica. El Universo es activo, no cabe duda, pero de una forma tremendamente ordenada.

Los científicos saben, desde hace cincuenta años, que las galaxias realizan determinados desplazamientos organizados, como siguiendo una especie de pauta de tráfico universal. No deja de ser peculiar que prácticamente todas las galaxias parezcan retroceder de modo constante, alejándose de nosotros como si nos amenazara alguna plaga. Y no sólo esto, sino que además se alejan obedeciendo a una grandiosa estrategia global. Cada galaxia se aleja a una velocidad proporcional a su distancia de la Tierra. Se trata de un hecho enormemente significativo: cuanto mayor es la distancia que nos separa de un cuerpo, tanto más veloz es su alejamiento de nosotros. Hay una relación lineal —una correlación perfecta— entre la velocidad y la distancia.

Si pensamos en ello por un momento, veremos que toda esta pauta de retrocesos, más rápidos de los cuerpos distantes, se debe a una explosión ocurrida en el pasado. Cuanto más distante se halle un cuerpo de nosotros, tanto mayor debió ser la fuerza con que él —o lo que lo integraba— fue expelido en un principio. Tal es precisamente la trayectoria de los fragmentos de metralla cuando explota una bomba adicional. No es necesario postular, y de hecho no hay ninguna prueba en este sentido, que una fuerza repulsiva está separando las galaxias. Lo cierto es que las galaxias son simplemente la metralla de una explosión primitiva, una bomba cósmica lanzada hace muchísimo tiempo.

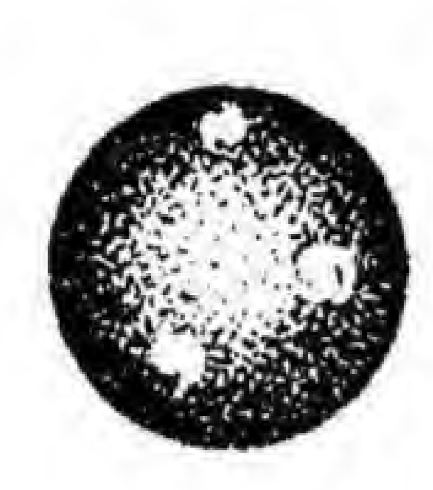
El movimiento de expansión de todas las galaxias demuestra que el Universo entero despliega una gran actividad. A la escala máxima, el propio Universo está en movimiento. No es en absoluto un pilar de estabilidad, sino que cambia con el tiempo. Se está expandiendo, y expandiendo de una forma controlada: en una palabra, evolucionando. Esto no significa que el Sistema Solar o las galaxias individuales estén aumentando físicamente de tamaño. Planetas, estrellas y galaxias son entidades dinámicamente intactas, sometidas a un movimiento gravitacional. Sólo comparten esta expansión universal los movimientos de las mayores agrupaciones de materia, y en consecuencia, las distancias que separan las galaxias y los cúmulos de galaxias aumentan con el tiempo.

Los astrofísicos, filósofos, teólogos y personas de todos los estratos de la sociedad querrían saber si el Universo continuará expandiéndose así para siempre, o si se detendrá algún día. También nos gustaría disponer de más información sobre la naturaleza de la explosión que dio origen a los movimientos de las galaxias. Si el Universo se expande eternamente, habrá un tiempo inimaginable para la evolución continuada de la materia y de la vida. Por el contrario, si el Universo incorporara materia suficiente, las fuerzas gravitatorias conjuntas podrían detener la expansión, e incluso provocar una contracción.

Esta última posibilidad sugiere varias preguntas: ¿Cuánto tiempo transcurriría hasta que el Universo dejase de expandirse? Si empieza efectivamente a contraerse, ¿qué ocurrirá en un eventual colapso de todo el Universo? ¿Acabará simplemente

como un punto pequeño y denso, parecido al que fue en un principio? ¿O rebotará y empezará a expandirse de nuevo? Tal vez ha rebotado ya anteriormente. Tal vez habitamos un Universo que se expande y contrae en ciclos sucesivos y no conoce un auténtico principio ni un verdadero fin.

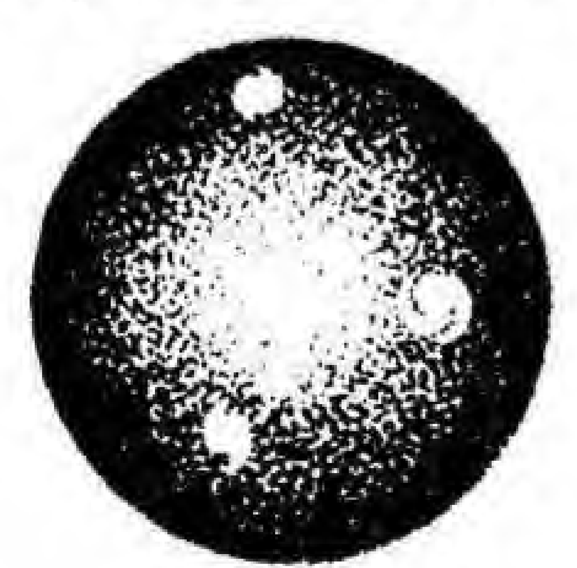
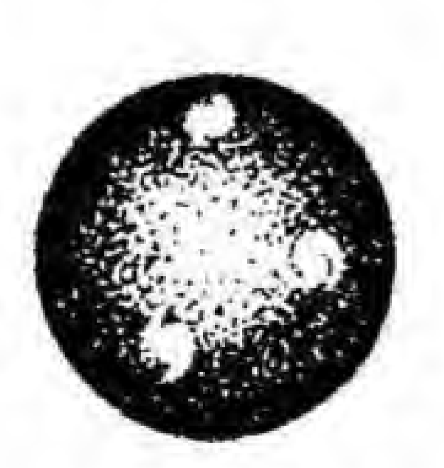
Tales son pues, a gran escala, los destinos básicos del Universo en general: puede expandirse eternamente. Puede expandirse y después contraerse hasta tocar a su fin. O puede expandirse y


contraerse indefinidamente. Cada modelo representa una hipótesis, una teoría basada en los datos disponibles. Pero a menos que podamos dar el tercer paso del método científico y ponerlas a prueba experimentalmente, es imposible saber qué versión es la correcta, suponiendo que lo sea alguna de ellas.

Por muy difícil que pueda parecer semejante tarea, los tres modelos están siendo actualmente sometidos a pruebas de observación por astrofísicos contemporáneos. Sus observaciones, y las teorías que los sustentan, buscan respuestas directas a muchas de las preguntas mencionadas. Pero incluso una apreciación superficial del estado actual de sus posiciones requiere un profundo conocimiento de la naturaleza del espacio y del tiempo. Para obtener dicho conocimiento, necesitamos una herramienta especial. Y esta herramienta es la teoría de la relatividad.

Hay personas que se inquietan y se sienten nerviosas e incómodas al oír la palabra *relatividad*. Pero, en su concepción, la teoría de la relatividad es bastante sencilla, y sus bases bastante directas, siempre que estemos dispuestos a renunciar al sentido común y a la intuición humana.


La relatividad es sencilla en su simetría, su belleza, su modo elegante de describir aspectos trascendentales del Universo. Es cierto que emplea matemáticas avanzadas (cálculo infinitesimal, etcétera) para cuantificar su aplicación al Universo real, pero aun así todos deberíamos esforzarnos por adquirir al menos unos rudimentos matemáticos a fin de comprender los conceptos de la teoría de la relatividad. Esta comprensión es la base para apreciar, aunque sólo sea cualitativamente, algunos de los misteriosos efectos astrofísicos que se encuentran al estudiar el origen del Universo, explorar los agujeros negros y modelar al Universo entero.

La teoría de la relatividad tiene dos principios fundamentales, ambos enunciados en 1905 por el físico germano-americano Albert Einstein; juntos conducen a la famosa ecuación $E = mc^2$, en la que E, m y c son símbolos que representan respectivamente a la energía, la masa y la velocidad de la luz. El primer principio mantiene que las leyes de la física son las mismas en todas partes y para todos los observadores. Independientemente de la situación de una persona, o de lo deprisa que dicha persona se esté moviendo, las leyes físicas básicas son invariables.

El segundo principio de la relatividad es que existe una cuarta dimensión —el tiempo—, que es en todos los aspectos equivalente a las tres dimensiones espaciales habituales. Hay tres dimensiones espaciales; la posición de un objeto puede describirse generalmente como a la derecha o la izquierda, arriba o abajo, dentro o fuera. Tres dimensiones son suficientes para describir *dónde* está cualquier objeto en el *espacio*. Pero es necesaria una cuarta dimensión de *tiempo* para describir *cuándo* existe un objeto: en el pasado o en el futuro. Al juntar el tiempo con las tres dimensiones espaciales, Einstein fue capaz de reconciliar ciertas inconsistencias de la concepción renacentista del mundo formulada por Isaac Newton. Einstein demostró que la velocidad de la luz es un número absoluto constante en todos los tiempos y para todos los observadores, con independencia de dónde, cuándo o cómo se mida la radiación. El espacio y el tiempo están de hecho tan estrechamente ligados en la concepción einsteiniana del Universo, que su autor nos instó a considerar estas dos cantidades no como espacio *y* tiempo, sino como una sola cosa: espacio-tiempo.

Una serie de importantes consecuencias de la teoría de la relatividad sólo puede explicarse cualitativamente por medio de analogías. He aquí una de ellas: supongamos que nos hallamos en un ascensor sin vista al exterior. Cuando sube, sentimos la atracción del suelo, especialmente en nuestros pies. Es fácil atri-

buir esta sensación a la aceleración ascensional del ascensor. Ahora imaginemos que este ascensor ciego existe en el espacio exterior, lejos de la Tierra. Normalmente sentiríamos la falta de gravedad que conocemos tan bien por haber visto flotar a los astronautas donde apenas hay fuerzas gravitacionales. Pero si sintiéramos que una atracción tiraba de nuestros cuerpos hacia abajo, se nos ocurrirían dos explicaciones. Podríamos aducir que el ascensor está acelerando hacia arriba en ausencia de la gravedad, lo cual nos mantiene adosados al suelo. O podríamos afirmar que el ascensor está en reposo en presencia de la gravedad, que nos atrae hacia abajo. Es imposible saber cuál de estas explicaciones es la correcta sin realizar experimentos en el mundo exterior: es decir, sin ver los objetos que hay fuera de este hipotético ascensor. Si pudiéramos mirar hacia fuera, no nos costaría nada establecer si el ascensor está realmente en reposo o acelerando. Relacionando el ascensor con el Universo circundante, es fácil determinar su verdadera posición.

Lo importante es que el efecto de la gravedad en un objeto y el efecto de la aceleración en un objeto son indistinguibles. Los científicos llaman a esto Principio de Equivalencia: la gravedad y la aceleración de objetos a través del espacio-tiempo pueden considerarse conceptual y matemáticamente equivalentes. En consecuencia, Einstein declaró innecesaria la concepción newtoniana de la gravedad como una fuerza de atracción. No sólo es innecesaria, sino que la teoría de Newton se considera actualmente menos exacta que la de Einstein.

Examinemos brevemente cómo la noción de objetos acelerados puede sustituir a la sensata idea de la gravedad. La relatividad general nos permite preguntar por qué la materia, que normalmente da origen a la concepción newtoniana de la gravedad, altera la naturaleza del espacio-tiempo. Prescindiendo de los detalles, la respuesta es que la materia curva o tuerce el espacio-tiempo. En otras palabras, la propia materia moldea eficazmente el espacio-tiempo.

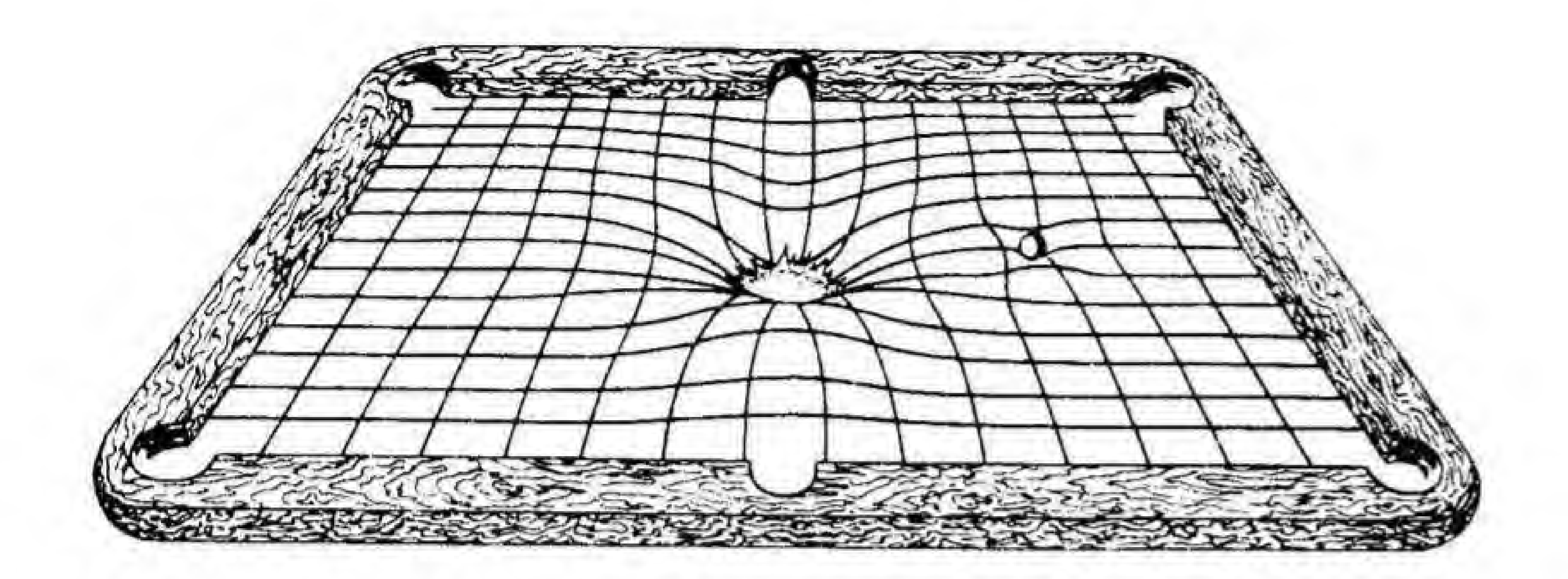
La geometría plana de Euclides (el tipo de geometría que se aprende en la segunda enseñanza) sigue siendo válida cuando el grado de curvatura es cero. Incluso cuando existe una ligera curva, la geometría euclidiana del espacio plano es casi exacta. Por ejemplo, un arquitecto puede diseñar un edificio para cualquier lugar de la superficie de la Tierra y un contratista puede construirlo, usando los procedimientos normales establecidos hace veinticinco siglos por el matemático griego Euclides. Pero aunque muchos la emplean aún a diario, la geometría plana no es totalmente exacta. No puede serlo, ya que la Tierra, después de

todo, no es plana, sino curva. La geometría plana de Euclides resulta satisfactoria en cualquier extensión de poca importancia, pero esto ocurre porque es imposible advertir la curvatura de nuestro planeta en las superficies pequeñas. En cuanto la curvatura de la Tierra se convierte en un factor importante, como en el caso de la navegación aérea intercontinental por ejemplo, se impone el empleo de una geometría más complicada: la del espacio curvo.

Lo mismo sucede en algunos puntos seleccionados del Universo; en ausencia de la materia, la curvatura del espacio-tiempo es cero, y un cuerpo en esta especie de plano se mueve uniformemente en línea recta. La dinámica newtoniana y la geometría de Euclides son válidas, para todos los fines prácticos, cuando el espacio-tiempo no es apreciablemente curvo. El espacio plano no es una situación hipotética, porque cabe suponer que más allá de las galaxias existe muy poca materia, por lo cual no puede esperarse ninguna curvatura del espacio.

En cambio, la geometría del espacio-tiempo sufre pronunciadas deformaciones cerca de los cuerpos con masa. No es el cuerpo ni su superficie lo que se curva: sólo el casi vacío del espacio-tiempo en que se encuentra el cuerpo. Cuanto mayor sea la cantidad de materia en un punto determinado, mayor será el grado de curvatura del espacio-tiempo en dicho punto. A distancias mayores de un cuerpo de gran masa el grado de curvatura disminuye. Como ocurre con la gravedad, el grado de curvatura del espacio-tiempo depende de la cantidad de materia y de la distancia de dicha materia. Pero, como esta concepción del espacio-tiempo curvado es más exacta que el concepto convencional de la gravedad, el punto de vista newtoniano del Universo debe ser reemplazado por el de Einstein a fin de ser exactos y precisos en todas las situaciones posibles.

Pero seguramente muchos se preguntarán: ¿Cómo puede una curva reemplazar a una fuerza? La respuesta es que la topografía del espacio-tiempo influencia la elección de rutas de los viajeros celestes de modo parecido a cómo Newton imaginó que la gravedad era capaz de desviar a un cuerpo de su camino. De la misma manera que una pelota no puede seguir una trayectoria en línea recta por los lados de un cuenco, así la forma del espacio causa la aceleración de los cuerpos, que no se mueven a lo largo de líneas rectas, sino por rutas curvadas. Por ejemplo, la Tierra se acelera en su órbita alrededor del Sol: no a causa de la gravedad, como explicaría Newton, sino debido a la curvatura del espacio-tiempo, como preferiría Einstein. Los habitantes de la Tierra no sentimos la aceleración de nuestro planeta, que sin embargo es un hecho; cualquier objeto que cambia la dirección de su movimiento está acelerando.



Para comprender mejor el concepto einsteiniano del espacio-tiempo consideremos una analogía. Imaginemos una mesa de billar cuya superficie no fuera el usual fondo duro recubierto de fieltro, sino simplemente una lámina de goma muy fina. Esta lámina se hundiría y deformaría si colocáramos sobre ella un objeto de mucho peso, una piedra, por ejemplo. La lámina de goma se curvaría, en especial en torno a la piedra, y cuanto más pesada fuera ésta, mayor sería la curvatura. Si intentáramos jugar a billar, veríamos que las bolas, al pasar cerca de la piedra, se desviaban por la curvatura de la superficie de la mesa.

De manera muy parecida, tanto la radiación como los objetos materiales son desviados por la curvatura del espacio-tiempo próximo a un cuerpo espacial. La trayectoria orbital de la Tierra es desviada de la línea recta por la ligera curvatura del espacio-tiempo creada por nuestro Sol. El grado de desviación es suficiente para obligar a nuestro planeta a describir un movimiento de rotación en torno al Sol. De modo similar, la Luna (o una pelota de béisbol) responden a la curvatura del espacio-tiempo creada por la Tierra, moviéndose en una línea curva. La desviación de la Luna no es demasiado grande, y obliga a nuestra vecina a describir eternamente una órbita en torno a la Tierra. La desviación de una pequeña pelota de béisbol es mucho mayor, por lo que la obliga a volver a la superficie de la Tierra.

Así pues, la noción de la gravedad no es más que el comportamiento natural de los objetos que se mueven dentro del marco geométrico de un espacio-tiempo curvado. Es posible, por lo tanto, usar el conocimiento del espacio-tiempo para predecir los movimientos de los cuerpos por el espacio y el tiempo. Todavía resulta más útil invertir el problema: estudiando el movimiento acelerado de cualquier cuerpo, podemos aprender algo sobre la geometría del espacio-tiempo que rodea a dicho cuerpo.

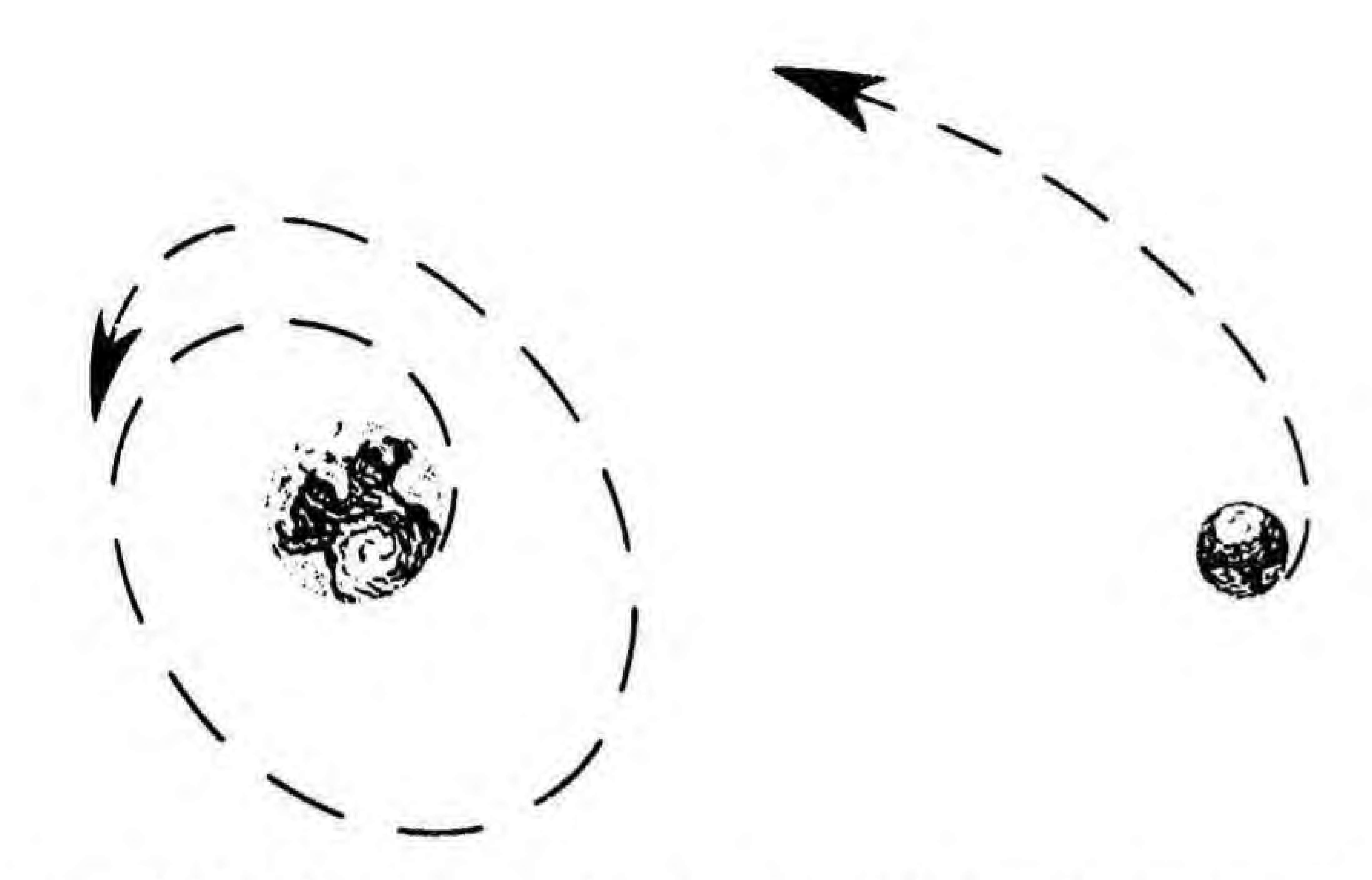
Y lo mismo ocurre con todo el Universo. Al buscar el tamaño, forma y estructura de todo el Universo —el mayor panorama

de todos—, es necesario considerar los efectos acumulados de la curvatura del espacio-tiempo cerca de cualquier cuerpo que se halle en el Cosmos. Estudiando el movimiento acelerado de toda la materia contenida en el Universo, podremos aprender algo sobre la curvatura de éste en su totalidad.

Aplicando los principios básicos de la relatividad hasta las últimas consecuencias de la teoría de campo, conseguiremos averiguar los modos concretos en que la materia deforma el espacio-tiempo. Ésta es la zona donde la teoría de la relatividad se hace notoriamente compleja; aquí será mejor que los teóricos se retiren y nos dejen en paz. Lo que lográsemos entender de sus ponderados cálculos sólo podría ser subjetivo. Para abreviar, los resultados son las llamadas ecuaciones de campo de Einstein. Es preciso resolver simultáneamente una docena de ecuaciones para determinar cómo está estructurado el Universo —es decir, cómo la materia presente curva el espacio-tiempo. Aunque por un lado estas ecuaciones son indescifrables, por el otro presentan una notable simetría; como obras de arte, son contempladas a menudo con admiración e incluso con cierto respeto. La complejidad se debe en gran parte a que, junto con estas ecuaciones que determinan la geometría del Universo, el relativista tiene que resolver además varias ecuaciones geodésimas para determinar el comportamiento de cualquier objeto dado en el Universo cerca de otros objetos.

Para ilustrar más a fondo la curvatura del espacio-tiempo examinaremos el siguiente ejemplo. Supongamos que hay dos planetas, cada uno habitado por una civilización capaz de lanzar cohetes al espacio. La Tierra puede ser uno de ellos, ya que en la actualidad disponemos de la tecnología requerida. Para el otro planeta, imaginemos que Marte posee una civilización tecnológica avanzada. Supongamos, además, que los habitantes de ambos planetas tienen cohetes idénticos. A los efectos de este ejemplo, demos por sentado que estos cohetes sólo pueden alcanzar cierta velocidad inicial en el lanzamiento, tras el cual viajan libremente por el espacio. Una vez lanzados los cohetes desde ambos planetas, las formas de sus trayectorias difieren. En la concepción newtoniana del espacio, la trayectoria del cohete queda determinada por la interacción gravitacional entre el cohete y cada planeta. En la concepción einsteiniana del espacio-tiempo, la trayectoria del cohete queda determinada por la reacción del cohete a la curva del espacio-tiempo creada por cada planeta.

Consideremos primero una posible trayectoria del cohete lanzado desde el planeta con mayor masa, la Tierra. En este caso se elige la velocidad inicial necesaria para colocar el cohete en



una órbita elíptica. Al igual que la gravedad, cuya fuerza decrece a medida que aumenta la distancia de un objeto, la curvatura del espacio-tiempo es más pronunciada cerca del planeta que posea una masa mayor. El cohete, por consiguiente, acelera cuando está cerca de él y disminuye la velocidad al alejarse. De este modo la relatividad general coincide con las leyes del movimiento planetario empíricamente descubiertas hace varios siglos por el astrónomo alemán Johannes Kepler. La relatividad afirma que el cohete acelera cuando está cerca de un objeto de mayor masa, porque en realidad está reaccionando a un mayor grado de curvatura del espacio-tiempo.

La elipse, una trayectoria geométrica cerrada, no es más que un posible tipo de ruta. Es una trayectoria de energía mínima, así calificada porque el cohete que describe semejante órbita no posee la energía suficiente para escapar de la influencia del planeta.

Los cohetes pueden seguir otras trayectorias. Consideremos la tomada por el cohete idéntico lanzado desde el planeta de menor masa, Marte. La misma velocidad inicial empleada para lanzar el cohete de la Tierra a una órbita elíptica es lo bastante grande como para propulsar al cohete muy lejos de Marte. En el lanzamiento desde Marte se utiliza menos energía que en el lanzamiento desde la Tierra, por lo que puede aplicarse más energía al movimiento del cohete, el cual escapa literalmente a la influencia de Marte porque, como diría un newtoniano clásico, Marte tiene menos fuerza gravitacional que la Tierra. Por el contrario,

los relativistas einsteinianos afirman que el cohete escapa de Marte porque este planeta de menor masa curva considerablemente menos que la Tierra el espacio-tiempo. Los dos puntos de vista —el de Newton y el de Einstein— predicen trayectorias virtualmente idénticas para el cohete según éste se aleja hacia regiones de espacio-tiempo progresivamente menos curvado por Marte.

La trayectoria resultante del cohete marciano se llama trayectoria hiperbólica. Es el tipo de ruta tomada por nuestras naves espaciales en sus investigaciones de otros planetas durante los últimos años. Prescindiendo de los demás cuerpos astronómicos que asimismo curvan el espacio-tiempo, podemos afirmar que cualquier objeto que siga la trayectoria hiperbólica tiene la suficiente energía para acercarse al infinito. En general, el objeto que describe una trayectoria hiperbólica posee más energía que el que recorre una ruta elíptica. Esto es un hecho cierto ya sea porque la velocidad inicial necesaria para lograr una trayectoria hiperbólica haya sido mucha, o porque la masa del cuerpo desde el que se realiza el lanzamiento sea poca. En el ejemplo considerado aquí, los cohetes son idénticos, así que la energía incrementada del caso hiperbólico es resultado de la masa relativamente pequeña de Marte.

Como es natural, incluso aunque se aleje mucho de su planeta materno, el cohete seguirá afectado por la fuerza de la gravedad o por la curva del espacio-tiempo creada por la masa de dicho planeta. Aun siendo sólo considerable en la inmediata proximidad del propio planeta, la influencia de Marte sobre el cohete nunca disminuye hasta cero. Análisis matemáticos demuestran que, en la ausencia hipotética de todos los demás objetos astronómicos, semejante cohete lanzado hiperbólicamente podría alcanzar el infinito. Pero como no hay nada que pueda alcanzar realmente el infinito, la afirmación equivale a decir que el cohete seguirá alejándose indefinidamente.

Los dos casos mencionados explican los modos convenientes de describir las trayectorias de cualquier objeto en términos de su contenido en energía y su reacción a la curvatura del espacio-tiempo. Serán analogías útiles cuando consideremos la esencia de la cosmología, porque entonces el «objeto» será el propio Universo en su totalidad. Volveremos a estas ideas dentro de un momento.

Einstein, como creador de la relatividad, estaba en mejor posición que nadie para usar sus ecuaciones y determinar con ellas la estructura y la naturaleza de todo el Universo. Sus ecuaciones de campo predijeron en 1917 que la curvatura de todo el Univer-



so debe ser realmente muy grande. La geometría plana de Euclides no sirve para examinar las propiedades del Cosmos. Por desgracia, la solución de Einstein sólo puede aplicarse en términos de un inimaginable espacio-tiempo cuatridimensional. De hecho, es imaginable matemáticamente, pero por completo inimaginable conceptualmente.

Para representarnos la esencia de la solución, podemos emplear una analogía. Nadie ha construido jamás un modelo visible en cuatro dimensiones, por lo que en esta analogía podríamos suprimir una de las cuatro. Y, en beneficio de la claridad, podríamos fusionar las tres dimensiones restantes en sólo dos dimensiones espaciales. Entonces, con el tiempo como tercera dimensión, podremos apreciar un modelo análogo tridimensional del Universo de Einstein.

El modelo análogo es una esfera. Consideraremos que todo el espacio está distribuido *por la superficie* de esta esfera. En otras palabras, las tres dimensiones espaciales han sido fusionadas en dos, y estas dos dimensiones existen sobre la superficie de la esfera. La otra dimensión —el tiempo— está representada por el radio, o profundidad, de la esfera.

Es importante subrayar una vez más que, en nuestra analogía, el Universo y su contenido *no* debe considerarse distribuido

dentro de la esfera, sino *sólo sobre su superficie*. Las tres dimensiones espaciales están curvadas —en este caso especial, en una esfera perfecta— simplemente a causa de la influencia neta de toda la materia que integra cualquier cuerpo astronómico. Supongamos, pues, que todas las galaxias, todas las estrellas, todos los planetas, e incluso toda la radiación existen solamente en la superficie de la esfera de este modelo de Universo.

Ahora bien, como el radio de esta esfera representa al tiempo, nos vemos obligados a concluir que este modelo análogo esférico crece con el tiempo. A fin de cuentas, el alejamiento de las galaxias es un hecho observado. A medida que pasa el tiempo, el radio de la esfera aumenta, así como el área de su superficie. De este modo, el modelo análogo tridimensional concuerda con el hecho observable de que en efecto el Universo está en expansión.

En realidad, Einstein no sabía en 1917 que el Universo está creciendo. Los astrónomos no establecieron la expansión del Universo hasta la década de 1920. Las propias ecuaciones de campo de Einstein habían profetizado esta expansión, pero él no lo creyó. Probablemente se dejó engañar por la filosofía aristotélica en que muy pocas cosas cambian. Así que siguió trabajando con sus ecuaciones de campo, introdujo un factor falso que eliminaba la expansión anunciada y obligó a su modelo del Universo a permanecer estacionario. Einstein se equivocó al hacer esto, naturalmente. Más tarde declaró que había sido el mayor error de su carrera científica. Pero mientras tanto, él y otros relativistas consiguieron dar con muchas características importantes del espacio-tiempo curvado. Uno de los mayores descubrimientos es conocido como el Principio Cosmológico: la noción de que todos los observadores perciben el Universo aproximadamente del mismo modo, con independencia de dónde se encuentren.

Para comprender el Principio Cosmológico, consideremos otra vez una esfera. Como puede ser cualquier clase de esfera, elijamos la Tierra. Imaginemos que nos encontramos en una desolada región de la superficie terrestre, tal vez en medio del Océano Pacífico. Para que la analogía sea válida, hemos de limitarnos a dos dimensiones espaciales; podemos mirar hacia este y oeste, norte y sur, pero no hacia arriba ni hacia abajo. Tal es la vida de un ficticio «habitante de las llanuras», de una persona que sólo puede imaginar dos dimensiones espaciales. Al percibir nuestro entorno, vemos por doquier un horizonte muy definido. La superficie *parece* llana y muy semejante en todas las direcciones, por lo que podríamos tener la impresión de estar en el centro de algo. Pero no estamos en absoluto en el centro de la superficie

terrestre. No existe centro de la superficie de una esfera. Tal es el Principio Cosmológico: no existe una ubicación privilegiada o central en la superficie de una esfera.

De modo similar, con independencia de nuestra posición en el Universo real de cuatro dimensiones, todos observamos más o menos la misma extensión de galaxias que contemplaría cualquier observador desde cualquier otro lugar del Universo. Pese a la contemplación de galaxias a nuestro alrededor, ello no significa necesariamente que residamos en el centro del Universo; de hecho, si nuestra analogía de la esfera es válida, no existe un centro del Universo. Tampoco existe ningún borde o frontera. El caso de un llanero colocado en la superficie de una esfera tridimensional es completamente análogo al de un viajero espacial navegando a través del Universo real de cuatro dimensiones. Ninguno alcanza jamás un borde o un límite. El llanero, si camina por la esfera lo bastante lejos y en una sola dirección, regresará finalmente al punto de partida. De forma similar, si el espacio-tiempo cuadrimensional está estructurado de acuerdo con esta analogía de la esfera —y tal vez sea así—, un astronauta podría ser lanzado en una dirección y regresar eventualmente al punto de partida desde la dirección opuesta.

En la actualidad reconocemos que el Universo no es completamente estático. Los movimientos de alejamiento de las galaxias son prueba indiscutible de ello. Precedidos por los esfuerzos realizados en los años veinte por el matemático ruso Alexander Friedmann y el sacerdote belga Georges Lemaître, los relativistas modernos buscan modelos más realistas del Universo, en especial los que tengan en cuenta la tasa de expansión observada del Universo. De este modo, las observaciones del alejamiento de las galaxias pondrían coto a los modelos plausibles del Universo y ayudarían a perfeccionar nuestra concepción de la gran panorámica en las postrimerías de este siglo XX.

Merece la pena subrayar que ningún lugar de la superficie de una esfera en expansión tiene un punto central, como no lo tiene una esfera en estado estacionario. El Principio Cosmológico sigue siendo válido aunque el Universo se esté expandiendo. Para verlo con claridad, volvamos a imaginar una esfera, pero ahora una que pueda expandirse. Por ejemplo, representémonos a toda la Tierra en expansión, con la superficie aumentando de tamaño a medida que pasa el tiempo. Situados en una «Tierra» hipotéticamente en expansión, podríamos ver alejarse objetos familiares: todos los objetos de la superficie, árboles, casas, montañas, darían la impresión de retroceder. Ahora, más que nunca, desearíamos concluir que nuestra posición es especial, que existimos en el centro de alguna explosión. Pero no es así. Nuestra posición no es más especial que la de cualquiera en la superficie de la esfera. De hecho, todos los habitantes de la esfera en expansión, podrían observar el alejamiento de las cosas que les rodearan. ¿Quién la vería mejor, entonces? Todos la verían igual. El alejamiento es observado *desde todas y cada una* de las posiciones en la superficie de una esfera en expansión.

Otra forma corriente de imaginar el mismo concepto es pintar puntos en la superficie de un globo. Los puntos representan las galaxias, y el globo, el Universo. Cuando el globo se hincha, todos los puntos se alejan unos de otros. Cualquiera que fuese la galaxia que habitáramos, observaríamos que todas las demás galaxias se alejaban. Las galaxias dan la impresión de retroceder a cualquier observador del Universo. No hay nada especial o peculiar en el hecho de que todas las galaxias se alejen de nosotros; el mismo caso se repite por doquier para todos los observadores. Tal es el Principio Cosmológico: Ningún observador de ningún lugar del Universo disfruta de una posición privilegiada.

Y así es en el Universo real de cuatro dimensiones. Pese al hecho de que todas las galaxias se alejan del planeta Tierra, no se trata de una peculiaridad de nuestro emplazamiento. Cualquier observador de cualquier lugar del Universo vería esencialmente la misma clase de alejamiento galáctico. Ni nosotros ni nadie está en el centro del Universo en expansión. No existe un verdadero centro en el *espacio*. No existe ninguna posición que algún día podamos identificar como el punto donde empezó la expansión universal.

Pero en cambio hay un centro en el *tiempo*. Es el origen del tiempo, y en nuestra analogía tridimensional del espacio-tiempo cuatridimensional corresponde al radio cero de la esfera. En otras palabras, al principio del Universo, la esfera tridimensional era un punto. Tenía radio cero. Éste fue el origen del tiempo. Es apropiado pensar en ello como el borde del tiempo. Pero no hay bordes en el espacio.

Es razonable formular la pregunta obvia: ¿Cuándo tuvo la esfera radio cero, cuándo fue un mero punto? Dicho de otro modo, ¿cuándo estuvo todo el contenido del Universo concentrado en una sola mota? Fundamentalmente formulado, ¿cuándo comenzó el tiempo?

Para apreciar las respuestas a estas preguntas, imaginemos que el tiempo puede invertirse. Podemos invertir mentalmente la expansión del Universo contrayéndolo al mismo ritmo al que le vemos expandirse. Las galaxias se acercarían entre sí, después se tocarían y al final quedarían fusionadas. Si podemos estimar el

tiempo que emplearía todo el Universo en encogerse hasta ser un solo punto, tendremos una medida de la edad del Universo.

La respuesta es aproximadamente quince mil millones de años. Así, la singular y compacta región del espacio a menudo asociada con el origen del Universo debió existir hace unos quince mil millones de años. Otra manera de considerarlo es que han pasado quince mil millones de años desde que la explosión de materia universal proyectó las fracciones hacia los emplazamientos donde ahora son observados.

En este cálculo, es considerable el margen de error porque el verdadero ritmo de la recesión galáctica resulta difícil de medir con exactitud. Algunos investigadores aducen que el Universo podría tener sólo diez mil millones de años, mientras otros mantienen que casi ha alcanzado los veinte mil millones. Un error de varios miles de millones de años puede parecer grande, pero la diferencia entre estos dos extremos es solamente un factor dos, en realidad bastante buen resultado para un tema de órdenes de magnitud como la astrofísica. Contemporizaremos adoptando para el Universo la edad aproximada de quince mil millones de años: un notable descubrimiento en y por sí mismo.

En el origen del tiempo, el Universo comenzó a expandirse. Como el aire que hincha un globo, el tiempo empuja al Universo hacia el futuro: las galaxias se alejan y el Universo se expande. En realidad, se expande a un ritmo inversamente proporcional a la densidad de la materia que contiene. A fin de cuentas, cada pizca de materia del Universo tira por gravitación de todas las demás masas, y como esta fuerza gravitatoria ejerce siempre una atracción, tiene tendencia a contrarrestar la expansión. Así, una gran cantidad de materia ejerce una fuerza gravitatoria considerable, y finalmente causa un retraso en la expansión universal. (Hemos vuelto a la noción de la gravedad; aunque el espacio curvado es un concepto más válido, emplearemos la conocida gravedad siempre que facilite la comprensión del argumento.)

El fenómeno de la expansión universal se parece a lo ocurrido con los cohetes considerados más arriba. Cada cohete se alejaba de su planeta materno a un ritmo inversamente proporcional a la masa del planeta. Marte, por ejemplo, atrajo con fuerza al cohete lanzado desde su superficie, pero fue incapaz de retrasar su fuga; la Tierra ejerció una fuerza todavía mayor sobre el cohete, y consiguió detener su ímpetu. La analogía entre la dinámica orbital de un cohete y la dinámica cósmica del Universo es excelente. Igual que para los cohetes, hay en esencia dos posibles modelos de un Universo cambiante y dinámico.

El primer modelo corresponde a un Universo que evolucionó a partir de un potente *bang* inicial, una especie de explosión que

sobrevino en el origen del tiempo. Después el Universo se expandió a partir de lo que debió ser una masa de materia primaria extraordinariamente densa. Con el paso del tiempo, el espacio diluyó la materia a través de todo el Universo, causando una disminución de la densidad media. En este primer modelo, la materia es insuficiente para contrarrestar la expansión, y por lo tanto, el Universo se expande indefinidamente, mientras la densidad de la materia va disminuyendo hasta llegar casi a cero. Este tipo de posible Universo llegará teóricamente al infinito a una velocidad finita (no cero). Es específicamente análogo al cohete que se aleja de Marte; este tipo de Universo posee una masa insuficiente para detener el ímpetu de la materia. Algunos investigadores se refieren a este caso como el modelo hiperbólico del Universo.

Se considera que un modelo hiperbólico implica un «Universo abierto», abierto en el sentido de que la explosión inicial fue lo bastante grande y la materia contenida lo bastante tenue para asegurar que este tipo de Universo no interrumpa nunca su expansión. Pese al hecho de que la materia ejerce por doquier atracción sobre todas las demás partes del Universo, este tipo nunca se colapsará sobre sí mismo. No hay suficiente materia para que esto suceda.

Como es natural, el Universo no puede llegar a ser infinitamente grande. Se requiere una infinita cantidad de tiempo para llegar al infinito. Así explica el matemático que el Universo hiperbólico o abierto continuará expandiéndose eternamente. Dicho con propiedad, el Universo se aproxima al infinito.

Si este modelo es correcto, las galaxias se alejarían indefinidamente. Con el tiempo, y desde un punto de observación de la Tierra, desaparecerán literalmente, se harán invisibles, y su radiación se irá debilitando con la distancia. Incluso las galaxias más próximas llegarán a alejarse tanto que apenas serán visibles, y algún día también ellas escaparán a nuestra observación; estarán demasiado lejos y su radiación llegará demasiado débil. La Vía Láctea será entonces la única materia existente en nuestro Universo observable. Todo lo demás, incluso a través de los telescopios más potentes, estará oscuro y silencioso. Y lo más alarmante es que con el tiempo la Vía Láctea desaparecerá a su vez a medida que se agote el hidrógeno de todas sus estrellas. Este tipo de Universo, y todo su contenido, sufre eventualmente una «muerte fría». Toda la radiación, materia y vida de semejante Universo está destinada a congelarse.

Hay otro modelo plausible del Universo. Como en el caso del Universo abierto, este modelo se expande con el tiempo a partir

de un punto original superdenso. Pero, a diferencia de aquél, este modelo contiene materia suficiente para detener la expansión universal antes de que alcance el infinito. Es decir, una vez que la explosión haya expelido inicialmente al Universo, el alejamiento de las galaxias entre sí va disminuyendo con lentitud hasta llegar a detenerse en un futuro lejano. Los astrónomos de todo el Universo — de todos los planetas de cualquier galaxia — anunciarán entonces que la expansión se ha interrumpido. El Principio Cosmológico garantiza que esta nueva concepción prevalecerá por doquier. El movimiento global del Universo, y de las galaxias contenidas en él, se detendrá — al menos momentáneamente.

La expansión puede detenerse, pero no así la fuerza de la gravedad. La atracción gravitacional es implacable. Por consiguiente, este tipo de Universo tendrá que contraerse; no puede permanecer inmóvil. No hay nada que no cambie nunca. La contracción de este tipo de Universo es el reverso de su expansión. No será un colapso instantáneo, sino un movimiento constante hacia un fin definitivo, y empleará en ello tanto tiempo como empleó en su expansión.

Este tipo de modelo es en muchos aspectos análogo a la trayectoria del cohete para el cual, en nuestro anterior ejemplo, la fuerza gravitacional era lo bastante potente como para forzarlo a seguir una trayectoria elíptica. Como su pauta geométrica es similar, un modelo del Universo que contenga materia suficiente para invertir la expansión se denomina con frecuencia Universo elíptico. Pero también se le llama «Universo cerrado» porque representa un Universo finito de tamaño finito. Tiene un principio y un fin.

La variación de la densidad en un Universo cerrado es interesante. A partir de lo que debe ser un valor inicial enormemente grande, ha perdido ya gran parte de su valor cuando el Universo empieza a contraerse, y lo recupera y vuelve a tener un valor inmensamente grande cuando, en una remota época del futuro, toda la materia se colapse sobre sí misma.

El esquema de expansión-contracción del Universo cerrado ofrece muchas implicaciones fascinantes (y aterradoras). La vida, en particular, que ha evolucionado constantemente de la sencillez a la complejidad durante la expansión, empezará a caer de nuevo en la simplicidad mientras se dirige inevitablemente hacia su fin durante la contracción. ¿Por qué? Porque hacia el final de la fase de contracción, las galaxias chocarán entre sí al disminuir la cantidad total de espacio en el que existe. Y del mismo modo que comprimiento un gas o frotando nuestras manos originamos calor por la fricción, las colisiones entre las galaxias generarán asimismo calor. El Universo entero será progresivamente más denso y caliente a medida que la contracción se aproxime al fin.

Cuando esté cerca del colapso total, la temperatura de todo el Universo será mayor que la de una estrella típica. Todo brillará: tanto, que las propias estrellas dejarán de lucir por falta de oscuridad contrastante. Así pues, este tipo de Universo se encogerá hasta llegar al estado de materia superdensa y supercaliente similar, si no idéntico, a aquel en que se originó. En contraste con el Universo abierto, que termina en cenizas heladas, este Universo cerrado sufrirá una «muerte por calor». El contenido de este Universo está destinado a achicharrarse.

Los cosmólogos no están seguros del destino ulterior de un Universo cerrado una vez haya llegado a este estado superdenso, supercaliente e infinitamente pequeño, conocido entre los científicos como singularidad. El Universo podría simplemente acabarse. O podría rebotar hacia otro ciclo de expansión y contracción. Con franqueza, todavía no se conocen las matemáticas de las singularidades. Este último estado de la materia plantea uno de los problemas más difíciles de la ciencia. Tal vez sea justo decir que la mayoría de astrofísicos ignoran tanto experimental como teóricamente la física de las singularidades.

La investigación más avanzada busca una explicación de la naturaleza de tan singular estado de la materia. La densidad y la temperatura aumentan de tal modo en la última fase de la contracción, que la presión — el producto de la densidad y la temperatura — debe experimentar un incremento fenomenal. La pregunta aún no contestada es: ¿Se limitará el Universo a acabar como un último punto minúsculo, o será suficiente esta presión para vencer a la implacable fuerza de la gravedad, propulsando así nuevamente al Universo hacia otro ciclo de expansión y contracción? En otras palabras, ¿podrá rebotar un Universo cerrado?

Existe obviamente cierta belleza filosófica en este modelo de un «Universo pulsante». No hay necesidad de una explosión única, no se precisa un *big bang*, ni tampoco un comienzo o un fin definitivos. El modelo pulsante pasa simplemente de una fase a otra — por un número infinito de fases —, cada una iniciada por una explosión o *bang* particular. De hecho, en un Universo pulsante hay muchos *bangs*; cada expansión es un «día» y cada contracción una «noche». Pero ninguno de estos *bangs* es único, ninguno de los orígenes es más importante que los otros. La oscilación soslaya el problema filosófico de imaginar qué precedió al *big bang* único de un Universo cerrado o abierto de un solo ciclo.

Si el modelo pulsante fuera válido, ya no necesitaríamos preocuparnos por el concepto de «existencia» antes del comienzo del

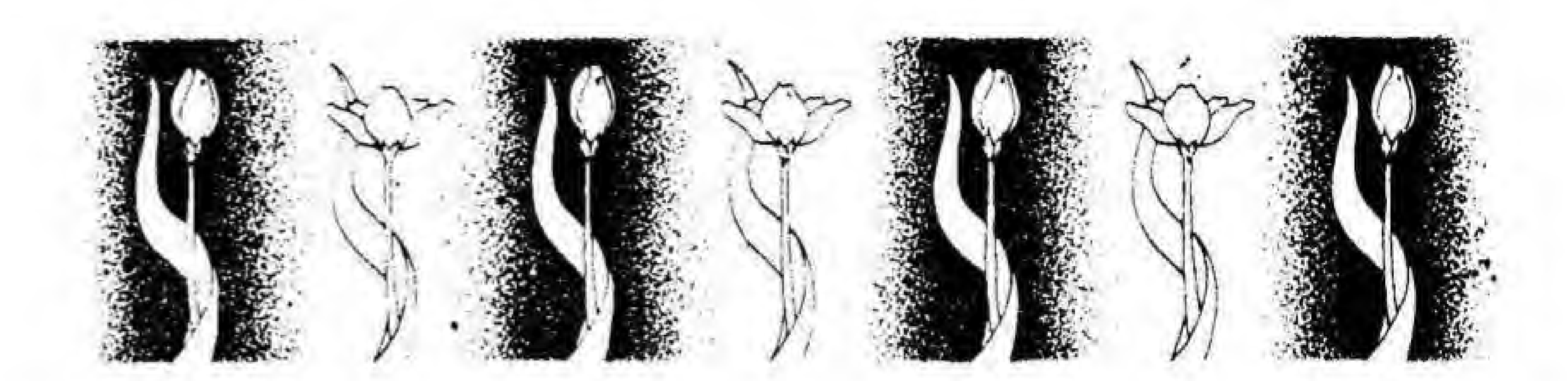
tiempo. En este modelo no hay inicio del tiempo. Un Universo semejante ha existido siempre y siempre existirá.

Los modelos de Universo mencionados más arriba tienen la evolución como principio orientador. Pueden derivarse de la teoría general de la relatividad de Einstein, y son aprobados de una forma u otra por los cosmólogos contemporáneos. Sin embargo, a través de los años se han propuesto otros modelos de Universo. La mayoría no se deriva directamente de la relatividad; algunos no admiten siquiera el cambio por el tiempo, ni abrazan la evolución como concepto central. Merece la pena considerar uno de los más destacados, porque fue apoyado hasta hace poco tiempo por algunos sectores de la comunidad científica.

El modelo de «estado estacionario» no sólo estipula que el Universo se muestra casi igual a todos los observadores, sino también que se muestra casi igual a todos los observadores *a través del tiempo*. Su principio fundamental está integrado en lo que a veces se llama el Principio Cosmológico *perfecto*: el estado físico del Universo es el mismo para cualquier observador en cualquier momento del tiempo. En otras palabras, la densidad media del Universo permanece eternamente constante. Se mantiene igual.

La motivación inicial para hallar un modelo de estado estacionario se basó tanto en la filosofía como en la ciencia. Dejando a un lado al Universo pulsante, muchos científicos y filósofos eran reacios (y aún lo son) a conceder que antes del único *big bang* no hubiera existido nada. Es en efecto una pregunta difícil inquirir sobre lo que precedió al origen del Universo. ¿Qué existió antes del único *big bang*? ¿Por qué se produjo una explosión? ¿Qué o quién la provocó? Estas preguntas no tienen respuesta en el ámbito de la ciencia contemporánea. Cuando no hay datos, el método científico se convierte en una técnica inútil. Filosofías, religiones y cultos pueden ofrecer toda clase de hipótesis, pero la ciencia permanece muda. El modelo de estado estacionario evita estas preguntas, al igual que el modelo pulsante. Ninguno de los dos tiene comienzo ni fin. El Universo existe simplemente para toda la eternidad.

Los cosmólogos que defienden el estado estacionario conceden que el Universo está expandiendo, porque les resulta imposible refutar el hecho observable de la recesión de las galaxias. Pretenden, sin embargo, que el «grosor» del Universo — la densidad media de la materia — permanece constante indefinidamente. Por lo tanto, ya que la recesión de las galaxias demuestra de forma irrevocable que la distancia media entre ellas debe estar aumentando, el modelo de estado estacionario requiere la apari-



ción de materia adicional. De otro modo, con la separación de las galaxias, la densidad media disminuiría inevitablemente. Por extraño que parezca, los partidarios del modelo estacionario proponen que esta materia se crea de la nada. Mediante la infusión de materia recién creada de esta forma, la densidad media de todo el contenido del Universo puede efectivamente mantenerse constante para siempre. Pese a la separación de las galaxias entre sí, la creación de galaxias adicionales en la cantidad justa puede mantener constante su número por unidad de volumen, preservando así para siempre la misma densidad universal.

El problema más evidente del modelo de estado estacionario es que no especifica cómo se crea la materia adicional. Ni dónde. Algunos investigadores sitúan su aparición más allá de las galaxias, en el espacio intergaláctico, mientras otros prefieren ubicarla en los centros de las galaxias. No se requiere mucha materia para frenar la disminución natural provocada por la separación de las galaxias. La creación de un solo átomo de hidrógeno en un volumen equivalente al de la cúpula de Houston cada equis años sería suficiente. Por desgracia, la repentina aparición de tan minúscula cantidad de materia dentro o fuera de las galaxias es actualmente imposible de detectar, y por tanto, de examinar.

Dejando aparte la cuestión de dónde pueda crearse la materia, el verdadero dilema es cómo crearla. La aparición de materia nueva surgida de la nada, viola uno de los conceptos más estimados de la ciencia contemporánea: la conservación de la materia y la energía. Un principio bien establecido de la física moderna mantiene que la suma de toda la materia y toda la energía es constante en todo el Universo. La materia puede crearse efectivamente de la energía (y la energía de la materia), pero es muy difícil comprender cómo podría crearse dicha materia de repente y a partir de la nada.

El gran enigma del modelo de estado estacionario es, pues, el proceso de la creación material. No obstante, el atractivo de un Universo que siempre haya existido y siempre existirá es muy fuerte, porque facilita un modo de soslayar la necesidad de un *big bang* único y todas las preguntas comprometedoras asociadas

con el origen de un Universo evolutivo. En general, al cosmólogo que aboga por el estado estacionario le cuesta tanto creer la hipótesis del *big bang*, como a un cosmólogo evolucionista la hipótesis de la creación continua. En cualquier caso, dejando a un lado las reservas mentales, observaremos ahora que la reciente investigación ha eliminado virtualmente la hipótesis del estado estacionario como modelo plausible de Universo.

¿Cómo distinguir entre estos diversos modelos posibles? Podemos empezar excluyendo casi inequívocamente el de estado estacionario por dos razones como mínimo. La primera es que la distribución de las galaxias no parece ser uniforme por todo el espacio. Las galaxias que se hallan a grandes distancias de la Tierra son mucho más numerosas que las cercanas. Si hubiéramos vivido en una de aquéllas (en épocas muy anteriores, cuando estos objetos eran presumiblemente los cuerpos astronómicos dominantes en el Universo), nuestro entorno habría rebosado de galaxias, superando con mucho a las que ahora rodean a la Tierra. El Principio Cosmológico Perfecto es objeto de una violación flagrante: el aspecto a gran escala del Universo no era hace muchos millones de años el mismo de ahora.

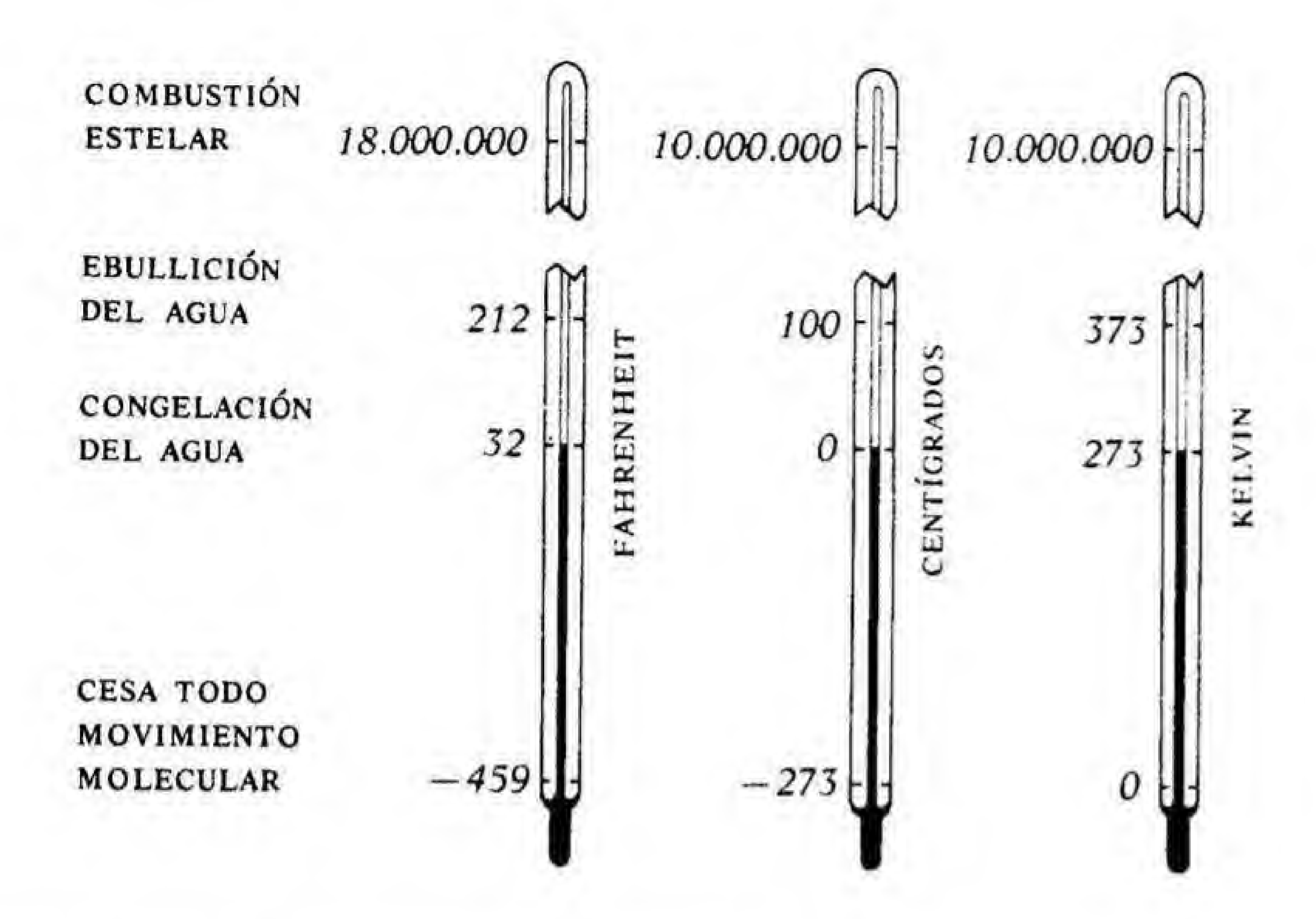
El segundo argumento en contra del modelo estacionario es resultado fortuito de la observación. Las observaciones hechas con radiotelescopios reciben siempre una señal a cualquier hora del día o de la noche. A diferencia de las observaciones ópticas, en las que a veces se halla un completo vacío de luz en las regiones tenebrosas y oscurecidas del espacio, las observaciones de radio nunca dejan de detectar alguna radiación. En ocasiones, la señal es fuerte, especialmente cuando el telescopio está enfocado hacia radiofuentes bien definidas. Otras veces es más débil, sobre todo en regiones desprovistas de cualquier radiofuente conocida. Sin embargo, siempre que se aísla la emisión acumulada de todas estas radiofuentes y de todo el ruido instrumental, persiste todavía una tenue señal de radio, una especie de débil silbido no muy diferente de las interferencias en una radio de amplitud modulada. Sin que nunca se intensifique o debilite, esta señal es detectable a cualquier hora del día o en cualquier día del año y, por añadidura, su intensidad no varía en ninguna dirección del cielo, o sea que es isotrópica. Al parecer, el Universo entero está invadido por esta radiación de escasa potencia.

Esta omnipresente señal de radio fue descubierta de modo formal hace poco más de una década durante un experimento destinado a mejorar en EE.UU. el sistema de comunicaciones por satélite. Los científicos se percataron inopinadamente del molesto silbido de radio que no daba muestras de querer interrumpirse. Ignorantes de haber detectado una radiación cosmológicamente importante, buscaron muchos orígenes diferentes para la interferencia, incluyendo tormentas atmosféricas, imperfecciones de la antena e incluso excrementos de paloma depositados en el interior del radiotelescopio. Conversaciones subsiguientes con físicos teóricos aclararon las dudas de los investigadores, explicándoles el origen más probable de la interferencia. Este origen es el propio Universo.

La débil radiación isotrópica es generalmente interpretada como un verdadero «fósil» de la explosión primaria que inició la expansión universal hace muchísimo tiempo. Este silbido superviviente suele recibir el nombre de radiación cósmica de fondo. Su existencia concuerda perfectamente con cualquiera de los modelos evolutivos del Universo, pero no hay lugar para ella en el modelo de estado estacionario.

Se supone que esta radiación cósmica de fondo es un vestigio de la fase extraordinariamente caliente del inicio del Universo — un Universo que se ha ido enfriando durante los últimos quince mil millones de años. Tanto si la explosión inicial fue un *big bang* único, responsable de un Universo abierto e infinito, o uno de varios *bangs* menores que condujeron a un Universo cerrado, finito y pulsante, la materia primaria, caliente y densa, debió emitir radiación termal. Todos los objetos calientes emiten radiación; un trozo de metal muy caliente, por ejemplo, emite una luz roja o blanca, mientras que el metal menos caliente es cálido al tacto y emite una radiación infrarroja o de radio menos intensa. En sus ígneos comienzos, es casi seguro que el Universo emitió una radiación de rayos gamma extremadamente intensa. Pero con el tiempo, el Universo se expandió, diluyó y enfrió, por lo que puede deducirse que la radiación emitida fue pasando gradualmente de la variedad de rayos gamma normalmente asociados con materia supercaliente, por los menos energéticos ultravioletas, visibles e infrarrojos, hasta llegar a la variedad de radio normalmente asociada con materia relativamente fría.

Los modelos evolutivos predicen que alrededor de quince mil millones de años después de la explosión primitiva, la temperatura media del Universo — reliquia de este *big bang* — debería ser muy fría, sin sobrepasar siquiera los −270 grados centígrados. Esto está muy por debajo de la temperatura de 0 grados centígrados a la que se congela el agua, y sólo unos pocos grados por encima del valor del frío absoluto en el que cesa todo movimiento atómico y molecular. En la escala científica, −270 grados centígrados equivalen a 3 grados Kelvin. Para confirmar la teoría, los investigadores han medido cuidadosamente la intensidad de la débil señal de radio isotrópica en una serie de frecuencias. La mejor solución para todos los datos obtenidos durante



la última década coincide sin duda alguna con una temperatura universal de aproximadamente −270 grados centígrados o 3 grados Kelvin. Además, este viejo fósil parece realmente invadir todo el Universo, incluyendo a la Tierra, el edificio y la habitación donde nos encontramos en este momento. La cantidad de radiación cósmica absorbida es, sin embargo, minúscula, ya que no llega a una millonésima parte de la potencia emitida por una bombilla de cien vatios.

La existencia de la radiación cósmica de fondo, junto con la diseminación de galaxias en el espacio, desacredita la hipótesis del estado estacionario como modelo factible del Universo. Es evidente que el Universo ha cambiado con el tiempo; no ha permanecido nunca estacionario. Así pues, la elección del modelo acertado de Universo debe hacerse entre los evolutivos y antes será preciso recoger más datos y examinarlos cuidadosamente.

El modo más directo de distinguir entre los modelos evolutivos «abierto» y «cerrado» requiere una estimación de la densidad media de la materia del Universo. Más que cualquier otra cosa, la densidad es lo que diferencia al modelo cerrado, que posee la materia suficiente para detener la expansión antes de que llegue al infinito, del modelo abierto, donde no hay la suficiente para conseguir esta interrupción.

Sería aventurado intentar hacer un inventario de toda la materia del Universo. Los autores no intentan contar todas las palabras de un manuscrito, sino que las calculan contando las de una sola página y multiplicando el resultado por el número de páginas. De modo similar, los astrofísicos pueden hacer una valoración de la cantidad de materia presente en un determinado volumen de espacio, y entonces extrapolar dicha cantidad para todo el Universo, lo cual equivale a estimar la densidad de la masa, porque la densidad no es otra cosa que masa por unidad de volumen.

La exacta densidad de materia necesaria para contener la expansión justo cuando los límites exteriores del Universo llegan al infinito, puede computarse teóricamente. Para el Universo diluido de la actualidad, la respuesta aproximada es de un millón de millones de millones de millones de millones (10^{30}) de veces menor de un gramo por centímetro cúbico. (Un centímetro cúbico es más o menos el volumen contenido en un pequeño dedal. El agua contenida en un dedal tendría una masa aproximada de un gramo y la densidad del líquido sería de un gramo por centímetro cúbico.) Esta densidad extraordinariamente pequeña equivale a unos pocos átomos de hidrógeno existentes en el interior de un volumen del tamaño de un típico armario empotrado. Esto es enormemente tenue; de hecho, muchos órdenes de magnitud más tenue que el mejor vacío que pueda obtenerse en laboratorios de física terrestres. Pero es preciso recordar que se trata de la densidad media de todo el Universo, incluidos cúmulos de galaxias donde está la materia, junto con el espacio intergaláctico, donde la materia es casi inexistente.

Si la densidad real del Universo es menor que este valor computado teóricamente, entonces el Universo está destinado a expandirse para siempre, lo cual es la característica de un modelo hiperbólico infinito. Si, por el contrario, la densidad real excede este valor, el Universo dejará un día de expandirse y empezará a contraerse, lo cual es el destino de un modelo elíptico, cerrado y finito.

Teorías aparte, ¿cómo podemos determinar la densidad real de la materia del Universo? A primera vista parece sencillo: basta medir la masa media de cada una de las galaxias situadas en cualquier parcela del espacio, estimar el volumen de dicho espacio y calcular la densidad total. Una vez hecho esto, los investigadores suelen encontrar una densidad diez veces menor que la cantidad requerida para detener la expansión universal. Hasta donde se puede determinar, este cálculo es independiente de si la región elegida contiene sólo unas pocas galaxias o una gran condensación de ellas; la densidad resultante será más o menos igual, dentro de un factor dos o tres.

Tales ejercicios para contar galaxias implican que el Universo es abierto, lo cual significa que se originó en un único *big bang* y se expandirá indefinidamente. Semejante Universo no tendrá fin, pero tuvo sin la menor duda un comienzo.

Aquí es preciso hacer una advertencia importante. Es posible que no toda la materia del Universo se encuentre alojada exclusivamente en las luminosas galaxias visibles. Observaciones recientes sugieren la existencia de alguna materia invisible lejos de cada una de las galaxias. Su cantidad y extensión es confusa por el momento, pero si existe fuera de las galaxias una cantidad de materia adicional diez veces mayor que la presente en su interior, la densidad universal se incrementaría en un factor superior al diez. Las reservas de materia que bordean las galaxias podrían en tal caso invertir la solución de esta primera prueba cosmológica, prediciendo un Universo cerrado que tendría fin además de comienzo. Esta prueba no sirve para saber si semejante Universo tuvo su origen en un único *big bang* antes del cual no existía nada, o si terminaría sin otro ciclo de expansión-contracción.

El valor de la densidad universal determinado por este método de contar galaxias es, pues, verdaderamente incierto en la actualidad, ya que el método no puede distinguir sin ambigüedades entre los modelos abierto y cerrado, aunque a primera vista parece ser favorable a un Universo abierto de expansión infinita.

Existe otra prueba basada en la observación que pretende determinar el destino último del Universo. Como el método anterior, esta segunda prueba trata de estimar la densidad media de la masa universal, basándose esencialmente en el hecho de que cada porción de materia ejerce su fuerza gravitacional sobre todas las demás. La pregunta específica de esta prueba es: ¿A qué ritmo está causando la materia distribuida por todo el Universo un retraso en la expansión universal? Dicho de otra manera, ¿a qué ritmo se está desacelerando el Universo?

Si el Universo empezó con una explosión, debió expandirse rápidamente al principio para desacelerar después de modo paulatino. La expansión de cualquier cosa — una bomba corriente, un trueno atmosférico, lo que sea — es siempre mayor en el momento de la explosión que posteriormente. De ahí que, puesto que observar el espacio equivale a mirar hacia atrás en el tiempo, el alejamiento de las galaxias tenga que ser mayor en las lejanas y mucho menor en las próximas. En la práctica, los cosmólogos intentan detectar cualquier cambio en la velocidad de alejamiento de las galaxias más cercanas a nosotros para compararla con la de las más distantes. Este cambio debe ser mayor en el modelo

cerrado y finito del Universo, ya que la gran cantidad de materia necesaria para contraer el Universo habría retrasado considerablemente la expansión universal en el curso de quince mil millones de años. Se predice que el modelo abierto e infinito mostraría un cambio menor en las velocidades de alejamiento de las galaxias, porque en este caso sería menor la desaceleración del Universo.

¿Qué indican los datos? ¿Existe alguna evidencia de una mayor velocidad de separación de las galaxias más distantes? Resumiendo, las galaxias más remotas parecen mostrar en efecto una velocidad de alejamiento sustancialmente mayor que las cercanas. Pero la exactitud de estas observaciones deja bastante que desear. Es evidente que la imagen de las galaxias más distantes es débil, por lo que observarlas resulta muy difícil. No obstante, esta segunda prueba cosmológica sugiere que el Universo es cerrado y finito, con lo que contradice a la primera, a menos que existan realmente más allá de las galaxias cantidades considerables de materia.

Así pues, en la actualidad se desconoce si vivimos en un Universo abierto o cerrado. Las últimas impresiones sugieren con claridad un Universo evolutivo, pero su último destino permanece oculto. Muchos cosmólogos se atreven a decir (y lo están diciendo desde hace dos décadas) que podemos esperar una respuesta definitiva para dentro de pocos años. Se trata tal vez de un optimismo excesivo, porque la solución final requiere el acuerdo de tres grupos de seres humanos a menudo discrepantes. Primero están los teóricos, esas mentes imaginativas que inventan los modelos e intentan determinar cómo debe ser el Universo. Les siguen los experimentadores, que no cesan de analizar las teorías y de extender sus observaciones a regiones cada vez más remotas del Universo real. Ellos intentan determinar cómo es realmente el Universo. Y por último están los escépticos, que consideran los modelos del primer grupo como una mera especulación y los resultados del segundo como interpretaciones exageradas de los datos, que no tienen en cuenta los errores de observación. En definitiva, las tres posturas son deseables, porque sólo mediante su colaboración y coordinación conseguiremos algún día acercarnos a la verdad.

ÉPOCA PRIMERA

Las Partículas

¿ORDEN POR AZAR?



miles de millones de años

¿Cómo fue el principio del Universo? ¿Qué ocurrió exactamente en el origen del tiempo? ¿Puede decirse algo en concreto sobre el origen en sí o sobre las condiciones reinantes en los primeros momentos del Universo?

No cabe duda de que estas preguntas son fundamentales y difíciles, pero quizá no existe ningún ser humano que no se las haya formulado alguna vez durante su vida. En la actualidad, después de más de diez mil años de civilización organizada, la ciencia el siglo XX parece dispuesta a facilitar alguna clave en relación con el verdadero origen de todas las cosas.

Las soluciones elaboradas por los astrofísicos deben considerarse provisionales y con reservas. Los tiempos remotos son tiempos pasados; es difícil precisar sobre lo que no puede observarse directamente. Pese a ello, se pueden construir modelos, esquemas matemáticos basados en un filón de datos relevantes que dictan la forma y estructura de nuestro Universo. Estos modelos nos dan una idea de cómo era el Universo hace más de diez mil millones de años.

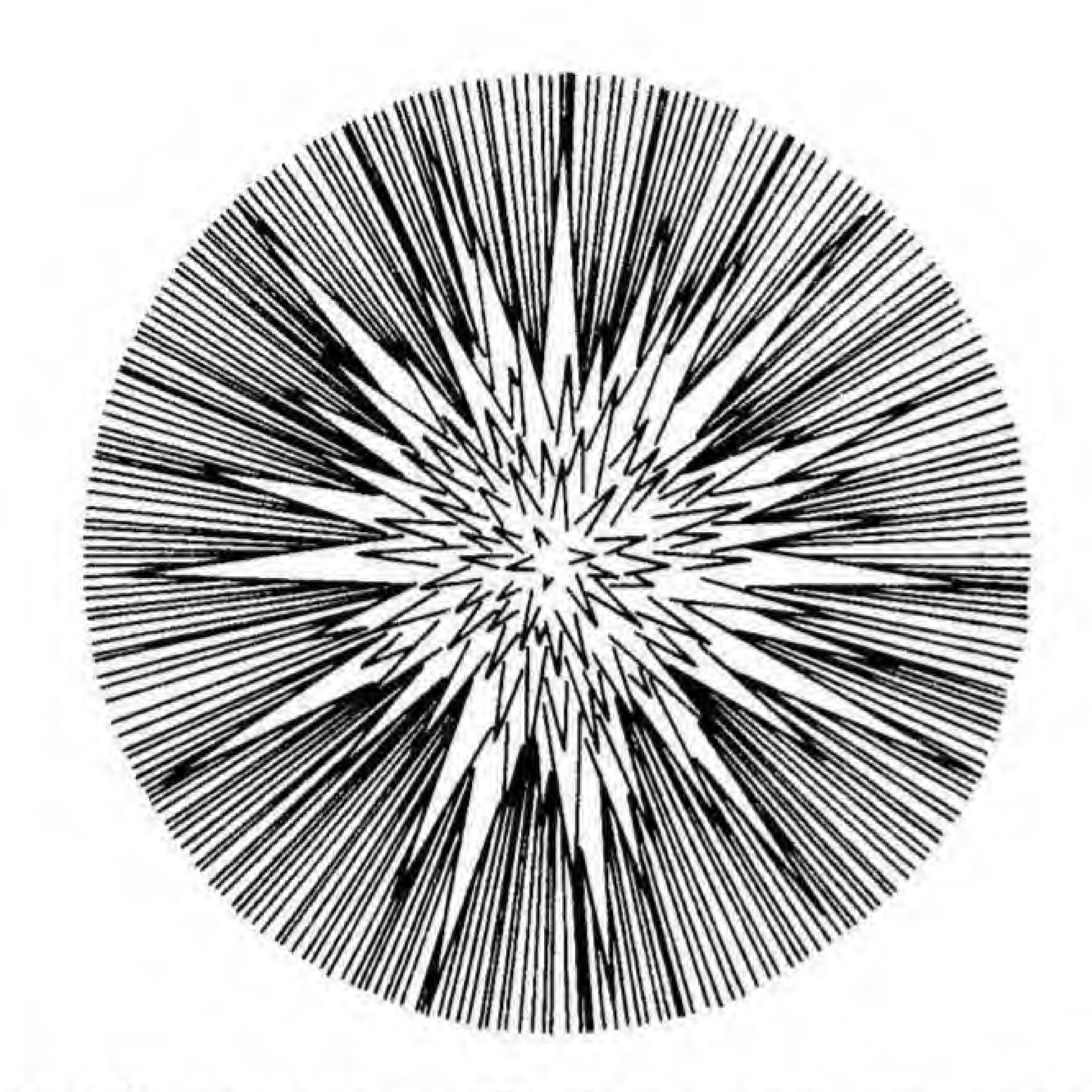
Para apreciar las primeras épocas del Universo, debemos disponernos a pensar con intensidad en tiempos muy remotos y a imaginar las condiciones generales anteriores a la creación de la Tierra y el Sol, e incluso a la de cualquier planeta o estrella. Hay quien tropieza con dificultades mentales a la hora de imaginar tiempos tan primitivos. Por fortuna, hay un truco que puede ayudarnos a comprender los primeros momentos del Universo.

Los físicos se ocupan principalmente de aplicar las leyes de la naturaleza al estado actual de algo, con objeto de predecir su futuro. En el caso de la gran panorámica, ese «algo» es todo el Universo. De ahí que si encontramos complicado invertir mentalmente el tiempo para apreciar las épocas más primitivas del orbe, podemos aprovechar la simetría natural de un modelo de Universo destinado a contraerse y tratar de predecir los acontecimientos físicos que sobrevendrán cuando un Universo cerrado se aproxime a la fase final de su colapso. Este procedimiento es válido no sólo porque las matemáticas que describen un Universo en contracción son un reflejo de las que describen un Universo en expansión, sino porque los acontecimientos que sobrevendrán justo antes del colapso total de un Universo en contracción copiarán los acontecimientos *ya* ocurridos justo después de que el mismo Universo empezara a expandirse. Empleando las leyes de la física para predecir los sucesos finales de un Universo en contracción, conseguiremos estudiar algo de las primeras consecuencias de la explosión primaria universal, acontecida hace aproximadamente quince mil millones de años. Dicho en términos más sencillos aún: las condiciones de tiempos próximos a la muerte del Universo pueden parecerse de modo asombroso a las que prevalecieron poco después de su nacimiento.

Incluso en el caso de que el Universo no sea cerrado y nunca se colapse hasta convertirse en una singularidad, los astrofísicos pueden utilizar el modelo cerrado para comprender teóricamente los hitos de las primeras épocas de un Universo evolutivo, sea cerrado o abierto.

Son necesarios experimentos numéricos para confeccionar estos modelos de Universo. Los experimentos son esencialmente ejercicios en masticación de números que requieren conocimientos matemáticos de las leyes de la física y una gran computadora. Los cálculos son complejos, ya que incorporan los puntos esenciales de todo lo que sabemos sobre el Universo. El objetivo es determinar la densidad y temperatura medias de todo el Universo en cualquier momento del tiempo. Los números computados pueden ser variados, a fin de confrontar el actual estado del modelo de Universo con el del Universo real.

¡La mayoría de experimentos numéricos indican que en el principio reinaba el caos! Es de todo punto imposible saber lo que pudo suceder en el momento exacto de la explosión: exactamente en el tiempo cero. Pero algunos teóricos arguyen que las condiciones físicas existentes casi inmediatamente después de la explosión pueden ser especificadas. Por ejemplo, las leyes de la física estipulan que un Universo más joven de una billonésima de una billonésima de segundo (es decir, 10^{-24} segundos) debió tener una densidad media mayor de un billón de billones de bi-



llones de billones (es decir, 10^{48}) de gramos por centímetro cúbico, y una temperatura media mayor de un billón de grados centígrados. Para que sirva de comparación, la densidad media del agua es de un gramo por centímetro cúbico; la del plomo, de unos cinco gramos por centímetro cúbico; y de los núcleos atómicos, de un mero billón de gramos por centímetro cúbico. La actual densidad media de todo el Universo es aproximadamente un millón de billones de billones de veces *menor* que la del agua (o unos 10^{-30} gramos por centímetro cúbico); ésta es la densidad media de *todas las cosas*: galaxias, estrellas, seres humanos, y la mayor parte del espacio vacío. De modo similar, el agua se congela a 0 grados centígrados y hierve a 100 grados, mientras que la temperatura media en la superficie de una estrella corriente es de varios miles de grados centígrados. La actual temperatura media de todo lo que integra el Universo supera sólo en unos pocos grados la temperatura a que cesa todo movimiento atómico y molecular, unos -270 grados centígrados.

En cuanto al tiempo, es prácticamente imposible apreciar semejante juventud; 10^{-24} segundos es la cantidad de tiempo que la luz necesita para cruzar un protón. ¡Más veloz que un destello! Fracciones de tiempo tan minúsculas son tan incomprensibles como las grandes densidades y temperaturas que caracterizan al recién nacido Universo, y sin embargo son las condiciones

predichas por las leyes de la física cuando un Universo en contracción se dirige inexorablemente hacia su fin. Fueron por lo tanto éstas, de acuerdo con los argumentos de la simetría esgrimidos más arriba, las condiciones reinantes en los primeros momentos del nacimiento del Universo.

La composición del Universo en aquellos instantes era indescriptible. Seguramente existía mucha energía, junto con exóticas partículas elementales de todo tipo, pero esto es casi lo único que puede decir la ciencia. La acción dominante en el origen de la época de las partículas debió ser sencillamente inimaginable.

Según todos los indicios, el Universo se originó por la explosión de algo increíblemente caliente y denso. Pero no sabemos qué fue ese algo, ni por qué explotó. Por qué el Universo empezó a expandirse de repente hace más de diez mil millones de años es una pregunta sin respuesta, y tan formidable que los científicos de hoy día ignoran incluso cómo formularla.

En un sentido más amplio, hay preguntas sobre el *qué*, sobre el *cómo* y sobre el *por qué*. Examinando materia microscópica y macroscópica con microscopios bioquímicos y telescopios astrofísicos, los científicos consiguen iniciar bastante bien la tarea de determinar *qué* hay en el Universo, desde átomos a galaxias. Armados con este detallado inventario de materia, pasamos a preguntar por el origen y la evolución de la materia; en otras palabras, *cómo* llegó hasta allí y *cómo* evolucionó hasta alcanzar su estado actual.

Sin embargo, inquirir sobre la naturaleza del origen nos obliga a formular preguntas sobre el *por qué*, y la más fundamental es: ¿Por qué existe un Universo? Los científicos no saben cómo formular preguntas sobre el por qué, pues dichas preguntas se hallan fuera de la formulación actual de la ciencia moderna. No hay ningún procedimiento conocido — ni siquiera el correspondiente método científico — para investigar por qué son como son las leyes de la física y la biología. Es probable que jamás conozcamos la respuesta. Tampoco sabemos por qué existe un Universo, ni tenemos la menor esperanza de saberlo algún día.

La dificultad fundamental al tratar de descubrir la naturaleza de lo que debió preceder al origen mismo del Universo es obvia: No hay datos. Ninguno en absoluto. Es cierto que algunas personas tienen hipótesis, pero son hipótesis que no se basan en ningún dato. Además, no disponemos actualmente de ningún medio para que los científicos puedan someter estas diversas hipótesis a pruebas experimentales.

Esto no es una crítica de los seres humanos que se interesan por el origen del Universo. Algunos científicos se preguntan a

menudo cómo podrían desarrollar experimentos para recoger datos preuniversales. Pero tal como están hoy día las cosas, preguntar sobre la naturaleza de lo que existió antes del *bang* no es inquirir sobre el origen del Universo, sino sobre el origen del origen.

En las páginas que siguen nos limitaremos necesariamente a discutir acontecimientos ocurridos desde el comienzo del Universo, dejando aparte la cuestión de por qué se originó. Hay que reconocer que la evolución cósmica constituye una amplia síntesis de los qués y los cómos.

Un microsegundo después de su nacimiento, el Universo estaba invadido por una gran mezcla de microscópicas partículas de materia. Fue una materialización directa —una creación— de materia a partir de la energía de la explosión primaria. No se trata aquí de ninguna clase de magia negra, sólo de un bien conocido y bien estudiado proceso nuclear en el cual las colisiones entre haces de radiación energética dan como resultado bloques elementales de materia.

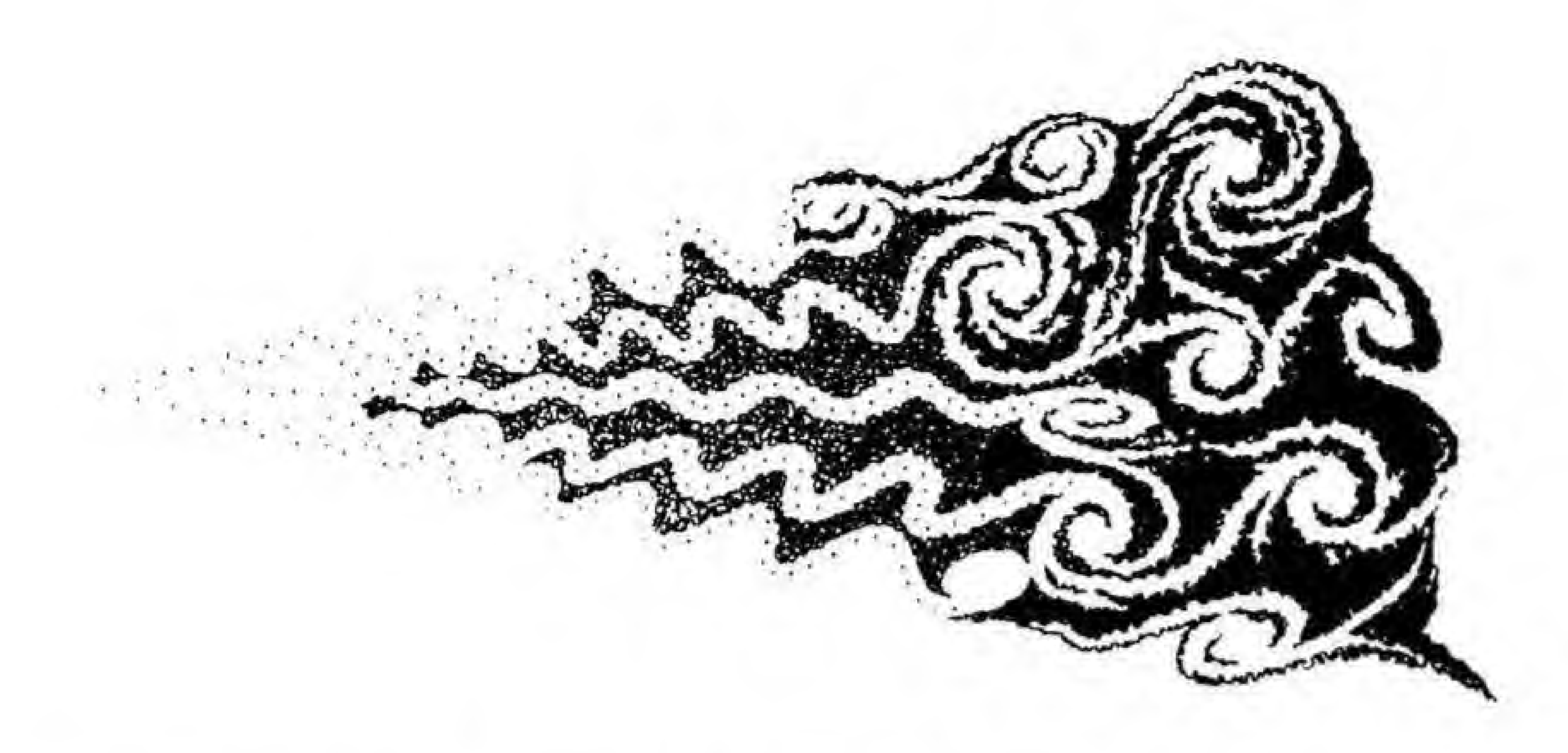
Llamadas hadrones, las partículas elementales pesadas, como los protones y neutrones, eran el tipo de materia más abundante en aquel momento. Semejantes partículas debían existir como entidades libres, si se consideran las temperaturas astronómicas prevalecientes en el Universo ya bien entrado en su primer segundo de existencia. Hacía demasiado calor para que estas partículas se unieran y formaran algo más sustancial. No cabe duda de que los hadrones colisionaban e interaccionaban entre sí y con otros tipos de partículas elementales, ya que la densidad era también enorme. Según los modelos teóricos, la acción dominante en aquellos momentos era la autoaniquilación de los hadrones en la radiación, creando así brillantes bolas de fuego. Por falta de una comprensión completa de las partículas elementales, los físicos saben muy poco sobre este misterioso período de la historia universal.

La composición básica del Universo continuó dispersándose con rapidez, enfriándose y diluyéndose sin interrupción. Alrededor de un milisegundo después de la explosión, las condiciones supercalientes y superdensas favorables para la creación de hadrones habían remitido, permitiendo así el predominio de partículas elementales más ligeras como electrones y neutrones. Esto inició otro proceso de materialización en el que se formó a partir de la energía toda una nueva clase de partículas ligeras, llamadas leptones, bajo una densidad media de diez mil millones de gramos por centímetro cúbico y a una temperatura de unos diez mil millones de grados centígrados. Estas condiciones físicas eran todavía excesivas según patrones terrestres, pero habían remitido considerablemente en comparación con el caos de densidad y calor imperante una fracción de segundo antes. De hecho, es importante comprender que una vez el Universo empezó a expandirse, lo hizo con enorme rapidez, enfriando y dispersando precipitadamente su contenido. Cuando hubo transcurrido el primer segundo, los leptones se autoaniquilaban en la radiación, como ya habían hecho los hadrones. La bola de fuego radiactiva de esta bomba cósmica seguía siendo impulsada por la luz y otros tipos de radiación.

La densidad de la radiación excedió considerablemente la densidad de la materia en los primeros minutos. No sólo las ondas de radiación superaron en número a las partículas de materia, sino que también la mayor parte de energía del Universo existía en forma de radiación, no de materia. En cuanto las partículas elementales intentaron coagularse, la violenta radiación procedió a destruirlas, impidiendo así la existencia del tipo simple de materia que ahora llamamos átomos. Por este motivo, la primera parte de la época de las partículas recibe a veces el nombre de Era de la Radiación. Toda la materia que lograba existir, lo hacía como un modesto precipitado suspendido en un mar de densa y brillante radiación.

El cambio continuó a medida que pasaba el tiempo. Pocos centenares de años después de la explosión, la densidad había disminuido hasta alcanzar un valor de una mil millonésima de gramo por centímetro cúbico, mientras la temperatura media había descendido a un millón de grados centígrados: valores no muy diferentes de los que imperan hoy día en las atmósferas de las estrellas. Característica principal de esta última parte de la época de las partículas fue la disminución constante de la bola de fuego original; todas las aniquilaciones de hadrones y leptones habían cesado prácticamente. Pero a medida que menguaba la bola de fuego, una importantísima transformación empezaba a producirse.

Los primeros siglos del Universo presenciaron la supremacía de la radiación sobre la materia. Todo el espacio estaba absolutamente inundado de luz, rayos X y rayos gamma. Sin embargo, a medida que el Universo se expandía con el tiempo, la densidad de la radiación disminuía con mayor rapidez que la densidad de la materia. La primitiva niebla de luz cegadora se diluyó paulatinamente, debilitando así el dominio de la radiación. En algún momento del intervalo que medió entre los primeros minutos y el millón de años posteriores a la explosión —el momento exacto no puede todavía determinarse mejor—, las partículas ele-



mentales cargadas empezaron a unirse. Sus propias fuerzas electromagnéticas se cuidaron de juntarlas, primero esporádicamente y después con mayor frecuencia. La radiación ya no podía separarlas con la misma rapidez con que se unían. De hecho, la autoridad de la radiación fue desapareciendo a medida que la materia se neutralizaba, un estado físico sobre el cual la radiación tuvo poca influencia. En cierto sentido, la materia venció a la bola de fuego cósmica cuando emergió como el principal constituyente del Universo. Para dar relieve a este hito fundamental de la evolución cósmica, la última parte de la época de las partículas y las restantes épocas ulteriores se llaman colectivamente Era de la Materia.

La aparición de la materia a partir de la radiación es la primera de dos transformaciones enormemente importantes de la historia universal.

Así pues, el inicio de la Era de la Materia vio la creación de los átomos. La influencia de la radiación se había debilitado tanto que ya no podía impedir la unión de las partículas elementales, leptones y hadrones, que había sobrevivido a la aniquilación. Los átomos de hidrógeno fueron el primer tipo de elemento que logró tomar forma, requiriendo únicamente que electrones aislados de carga negativa fueran atraídos electromagnéticamente hacia protones aislados de carga positiva. De este modo, ingentes cantidades de hidrógeno fueron sintetizados en el Universo primitivo.

El hidrógeno es el elemento ancestral común a todas las cosas.

El hidrógeno no fue la única clase de átomo formado durante la época de las partículas. Antes de que todos los electrones y

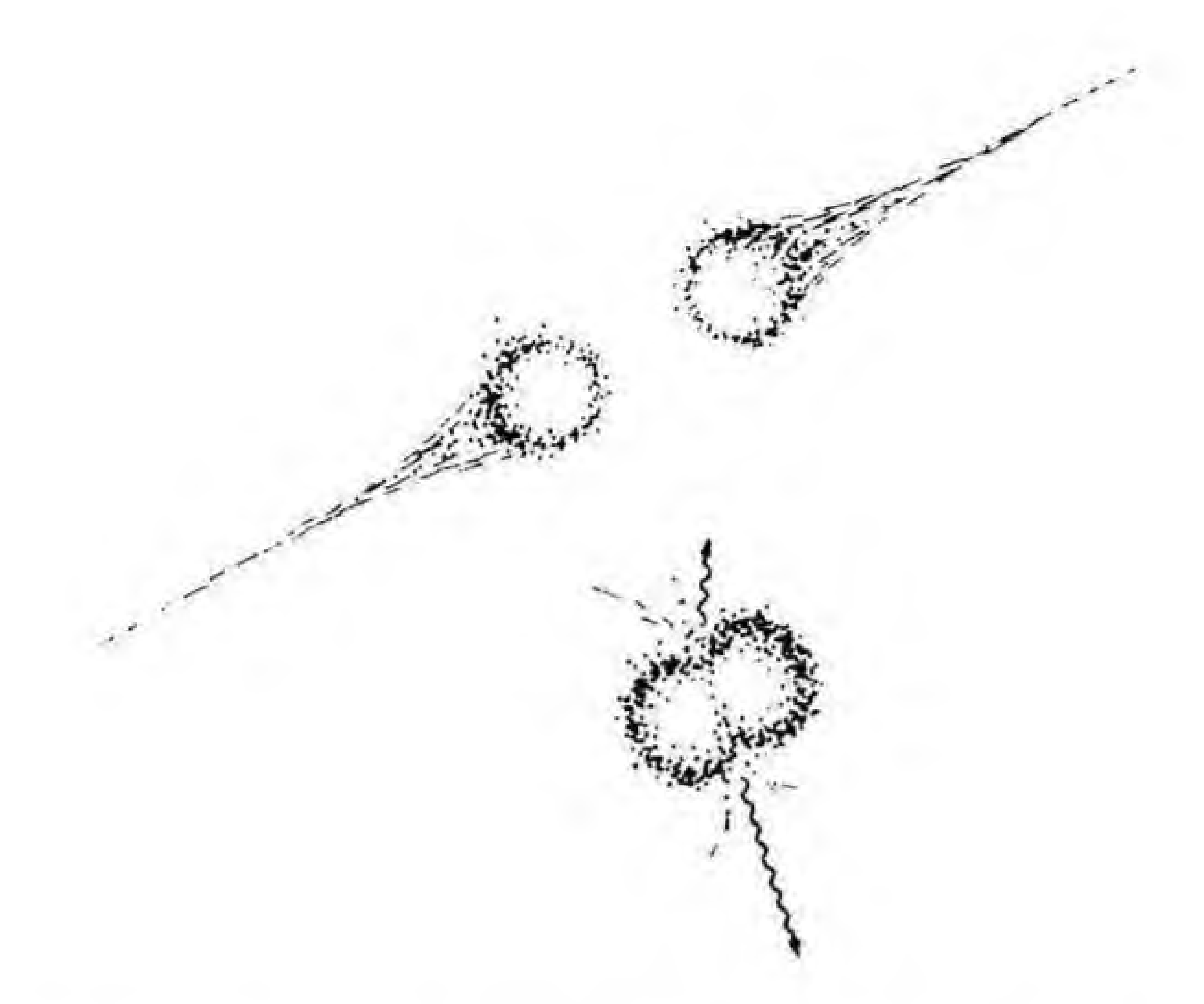
protones se convirtieran en hidrógeno, empezaron a materializarse átomos del segundo elemento más simple, el helio.

Los elementos pesados surgen inevitablemente cuando se fusionan dos o más elementos ligeros, y lo hacen mediante un proceso de dos fases. Pero se crea el pesado núcleo de un átomo al colisionar con violencia átomos más ligeros. Después, el núcleo recién formado, que es de carga positiva, atrae a un número determinado de electrones de carga negativa, originando así un átomo neutral, aunque más pesado.

En el caso de la creación del helio, se requiere una temperatura de por lo menos diez millones de grados centígrados para juntar dos núcleos de hidrógeno (protones); cada uno de ellos tiene una carga positiva, y a temperaturas menores se repelerían mutuamente como polos magnéticos idénticos. Esta temperatura mínima garantiza la colisión de los núcleos de hidrógeno con la violencia suficiente para traspasar la natural barrera electromagnética que en circunstancias ordinarias impediría su interacción. Durante una fracción de segundo, las partículas en colisión entran en el radio de acción extremadamente reducido de la potente fuerza nuclear. Cuando se encuentran a una billonésima de centímetro uno de otro, los dos núcleos de hidrógeno ya no se repelen. El control es ejercido entonces por la atracción de la fuerza nuclear, que los junta con enorme furor y los funde instantáneamente en un núcleo más pesado. El mismo proceso está ocurriendo ahora mismo en el núcleo de todas las estrellas. Y es este mismo proceso el empleado por los seres humanos, aunque a una escala mucho menor e incontrolada, en forma de las modernas armas termonucleares, en especial la bomba de hidrógeno.

En los últimos estadios de la época de las partículas, las condiciones físicas estaban maduras para la creación de núcleos de helio a partir de los protones de la bola de fuego primitiva. Poco después, parejas de electrones fueron atraídas electromagnéticamente hacia respectivos núcleos de helio, fabricando así átomos neutròs de helio. Dado el ritmo al que la mayoría de modelos sugieren que se produjo la expansión y el enfriamiento del Universo, no todo el hidrógeno pudo transformarse en helio; quizá por cada átomo de helio quedaron diez átomos de hidrógeno.

En cambio, elementos más pesados que el helio no pudieron crearse apreciablemente en el Universo primario. Los elementos que componen esta página que estamos leyendo, el aire que respiramos y las monedas que tenemos en el bolsillo no se crearon en los siglos siguientes a la explosión inicial. La fusión de elementos más pesados, como carbono, nitrógeno, oxígeno, hierro y uranio, requiere temperaturas mucho más elevadas que diez millones de grados centígrados. Semejantes síntesis precisan además grandes cantidades de átomos de helio. El mayor problema



a este respecto estribó en que pese a ser la producción de átomos de helio enormemente abundante durante la última parte de la época de las partículas, la temperatura media descendía con rapidez. Al fin y al cabo, el Universo se expandía a gran velocidad, como resultado de su explosión primaria. Cálculos teóricos sugieren que, cuando hubo suficientes átomos de helio para interaccionar entre sí y fabricar algunos de los elementos más pesados, la temperatura cósmica había caído por debajo del valor indispensable para la penetración mutua de núcleos de helio doblemente cargados. Este valor mínimo es de cien millones de grados centígrados, porque se necesita una gran violencia para que núcleos de doble carga colisionen, se junten y se fusionen entre sí. El Universo ya no estaba lo bastante caliente como para permitir que ocurriera esto.

En contraste con el progresivo enfriamiento y dispersión del Universo primitivo, la materia compacta de las estrellas, aún no creada por aquel entonces, es perfectamente idónea para la generación de temperaturas más altas, mayores densidades, colisiones más brutales, y por ende, elementos pesados. En las entrañas de las estrellas fue pues, donde finalmente se crearon estos elementos, aunque mucho después de la época de las partículas. Es allí donde todavía se siguen creando en la actualidad.

Un átomo de materia ordinaria es una entidad microscópica invisible hecha de un núcleo pesado de carga negativa. Todos los átomos hallados en la Tierra y la Luna tienen esta estructura

común. Además, la radiación recibida de los cuerpos extraterrestres, próximos y remotos, confirma esta misma estructura básica para todos los átomos, dondequiera que estén.

Algunos teóricos se preguntan si no podría haber otras clases de átomos: no sólo elementos diferentes, sino átomos fundamentalmente distintos de los que conocemos en la Tierra. ¿Por qué, pongamos por ejemplo, han de tener siempre los pesados núcleos una carga positiva, relegando la negativa a los ligeros electrones? Arguyen que el Universo sería filosóficamente más placentero si sus ladrillos tuvieran más simetría en su carga y su masa. En otras palabras, quizá el Universo posea también átomos hechos de núcleos con carga negativa alrededor de los cuales giran en órbita partículas de carga positiva. De hecho, los experimentadores descubrieron a mediados de este siglo varias partículas ligeras de carga positiva, y ahora conocemos varias partículas pesadas que tienen una carga negativa. Estas llamadas partículas antimateria son idénticas a las partículas de materia corriente en todos los aspectos menos en la carga. Una partícula llamada positrón, por ejemplo, es exactamente igual que un electrón, pero con carga positiva. Estos mismos experimentos demostraron además que cuando una partícula de materia y su contrapartida de antimateria colisionan, el resultado es una explosión que emite energía pura de la variedad letal de los rayos gamma.

También puede ocurrir el fenómeno inverso. A condición de que la temperatura sea extraordinariamente elevada (del orden de miles de millones de grados centígrados), las colisiones entre haces de radiación gamma pueden producir parejas de partículas elementales, por ejemplo, un electrón de materia y un positrón de antimateria. Esta especie de «materialización» de materia y antimateria a partir de la energía sigue obedeciendo a las leyes fundamentales de la física; en este caso, uno (energía, o E) se convierte simplemente en el otro (masa, o m), conversión que obedece a la famosa relación $E = mc^2$, en la que c simboliza la velocidad de la luz.

Ésta y otras clases de conversión de energía en masa es precisamente lo que los modelos teóricos sugieren que ocurrió en los primeros momentos del Universo. Sin embargo, no observamos mucha antimateria a nuestro alrededor. La Tierra, los otros planetas y el Sol parecen estar compuestos de materia corriente. Las excepciones incluyen a algunas partículas producidas en reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas, a una pequeña fracción de los misteriosos rayos cósmicos que llueven a diario sobre la Tierra, y a fragmentos microscópicos creados en momentos fugaces cuando partículas elementales colisionan en laboratorios nucleares aquí en la Tierra. Pero prácticamente toda la masa del Sistema Solar parece ser de materia

corriente, con pocas trazas de la antimateria que se produce también de modo natural. Si materia y antimateria fueron creadas en cantidades iguales por la energía primaria en el mismo origen del Universo, ¿a dónde ha ido a parar toda la antimateria?

Es importante comprender que la antimateria no implica antigravedad. Las partículas de antimateria se atraen gravitacionalmente igual como lo hacen dos o más partículas de materia. La única propiedad que distingue a la materia de la antimateria es la carga; la masa de cada partícula de materia es idéntica a la de su contrapartida de antimateria, de ahí que la gravedad atraiga siempre sin empujar nunca. No se conoce que exista en ningún lugar del Universo algo como la «antigravedad».

Nada impide, en principio, que partículas elementales de antimateria se mezclen en grandes grupos. Antihidrógeno, antioxígeno, anticarbono y numerosos antiátomos podrían formar antiplanetas, antiestrellas y antigalaxias. El hecho de que no conozcamos semejantes agrupaciones de antimateria no excluye su existencia. Como los átomos de antimateria emiten y absorben precisamente el mismo tipo de fotones que los átomos de materia corriente, no hay manera de determinar si, por ejemplo, una estrella remota está compuesta en su mayor parte de materia o antimateria. Las observaciones espectroscópicas de un conglomerado de antimateria serían idénticas a las de un conglomerado de materia. Por consiguiente, el cercano sistema estelar de Alfa Centauri o la Galaxia de Andrómeda, así como muchas otras estrellas y galaxias, *podrían* estar compuestas de antimateria.

A pesar de que nuestro Sistema Solar está hecho principal, si no totalmente, de materia, es muy posible que existan grandes bolsas de antimateria en otros puntos del Universo. Siempre que las agrupaciones de materia permanezcan separadas de las de antimateria, ambas pueden coexistir sin ninguna dificultad. En cuanto a dónde puede encontrarse la antimateria primitiva, podemos conjeturar que está oculta en inmensas y distintas agrupaciones a ingentes distancias de nuestro Sistema Solar. Pero si se acercaran demasiado entre sí cuerpos similares de materia y antimateria, se aniquilarían mutuamente. Por lo tanto, si nuestra civilización adquiere algún día la facultad de viajar más allá de nuestro Sistema Solar, será importante enviar sondas autónomas antes de visitar mundos extraños, y así, en caso de que este ingenio espacial no tripulado se evaporase en una nube de rayos gamma, tendríamos ocasión de cambiar nuestro rumbo.

Debemos reconocer que en la actualidad no hay ninguna prueba experimental de la existencia de cuerpos de antimateria más allá de la Tierra. Ésta se infiere teóricamente sobre la base de la simetría de materia y antimateria que se supone creada de la energía en los primeros momentos del Universo.

Al término de la época de las partículas, el Universo había evolucionado espectacularmente. La brillante bola de fuego asociada con el origen de todas las cosas había perdido intensidad. Las condiciones físicas de temperatura y densidad que guían todos los cambios del Universo habían experimentado un cambio extraordinario. La materia había arrebatado el control a la radiación, anunciando una era totalmente nueva. Se habían sintetizado átomos, exclusivamente de hidrógeno y helio.

A partir de entonces, los cambios espectaculares se producirían con menor frecuencia en el Universo. El cambio continuó, pero a un ritmo más pausado. Las transacciones importantes entre materia y radiación debieron ocurrir a toda prisa inmediatamente después de la explosión, y especialmente en los primeros minutos del Universo. Pero estas interacciones fueron disminuyendo y ya se producían de modo muy espaciado al final de la época de las partículas. La densidad media decreció enormemente durante la época inicial, precipitándose por debajo de una mil millonésima de una mil millonésima parte de un gramo por centímetro cúbico antes de que terminara la época — alrededor de un millón de años después del origen del Universo. La temperatura media universal también había disminuido hasta rozar los relativamente frescos mil grados centígrados.

Con el tiempo, el Universo se había dispersado, enfriado y oscurecido. Estaba destinado a evolucionar con una lentitud mucho mayor en épocas posteriores, pero también a seguir evolucionando. Las condiciones físicas medias llevaban camino de ser mil millones de veces menos densas y mil veces menos calientes, o sea, las condiciones tenues y frígidas presentes ahora a más de diez mil millones de años de la explosión inicial; la grandeza fosilizada de una era antigua y gloriosa.

La historia del Universo primitivo ofrecida aquí representa el criterio generalizado entre los cosmólogos. Sin embargo, no todos están de acuerdo con los sucesos anteriores al primer segundo de existencia. Cuanto más indagamos en el remoto pasado, más inseguras son nuestras declaraciones, ya que la temperatura y la densidad de aquel primer instante del Universo permanecen muy confusas, sobre todo porque sus valores dependen de interacciones, entendidas de modo incompleto, entre las partículas elementales pesadas.

Sujetas a las complicaciones del modelo teórico elegido, las dimensiones de los acontecimientos acaecidos durante los primeros segundos pueden diferir en varios órdenes de magnitud, lo

cual no es sorprendente, ya que los primeros momentos del Universo desaparecieron en la expansión y se perdieron para siempre en la evolución. Podemos imaginar sólo indirectamente los antiquísimos orígenes de la naturaleza, ayudados por las muletas de fórmulas abstractas y símbolos lógicos. Ello no obstante, lo que encontramos en casi todos los modelos es un Universo primitivo de un calor y una densidad extraordinarios, que se fue enfriando y dispersando con el transcurso del tiempo, promoviendo gradualmente la sucesiva formación de galaxias, estrellas, planetas y vida.

ÉPOCA SEGUNDA

LAS GALAXIAS

UNA JERARQUIA DE ESTRUCTURAS



Es posible que los descendientes de nuestra civilización no progresen nunca lo suficiente como para viajar lejos de nuestra Galaxia, la Vía Láctea — lo bastante lejos para mirar hacia atrás y contemplar toda su grandeza. El espléndido panorama de nuestro enjambre de estrellas flotando altivo y silencioso en el casi vacío del espacio quizá se nos niegue para siempre. Sin embargo, desde nuestra Tierra situada al borde de la galaxia, podemos examinar en toda su extensión otros colosales sistemas estelares muy alejados de nuestra Vía Láctea.

El espacio profundo contiene miríadas de objetos cuyo aspecto no se parece en nada a las estrellas. Muchos tienen forma de lente, o de rizo, y a menudo recuerdan más a un disco que a la imagen clara, brillante y esférica que se suele asociar con las estrellas. El filósofo alemán del siglo XVIII Emmanuel Kant los consideraba «universos islas» individuales muy distantes de los confines de la Vía Láctea. Denominar a cada una un «universo» presenta un claro problema de semántica, pero tenía razón al decir que estas manchas luminosas no estelares existen fuera de nuestra Galaxia.

Los grandes telescopios han revelado que estos faros distantes y confusos son galaxias enteras, cada una de las cuales mide de un extremo a otro, unos cien mil años luz por lo general. Repletas literalmente de centenares de miles de millones de estrellas agrupadas por la atracción gravitatoria, cada galaxia alberga más estrellas que habitantes ha tenido la Tierra desde su origen. Silenciosa y majestuosamente, las galaxias giran en las vastas extensiones del Universo como gigantescas girándulas de radiación,

materia y acaso vida, impartiéndonos al mismo tiempo una sensación de la inmensidad del Universo y de la mediocridad de nuestra propia posición en él.

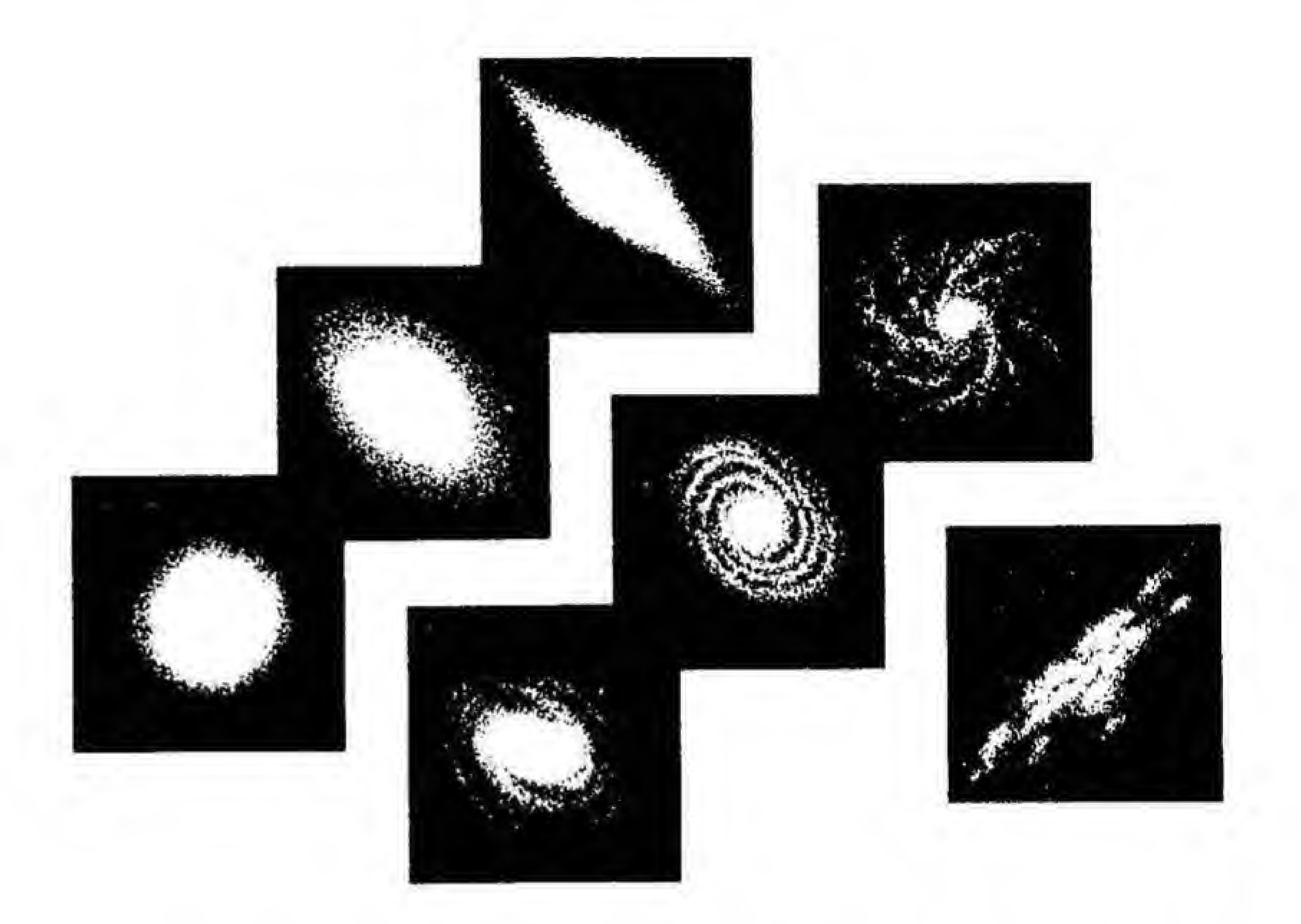
Los objetos que en las fotografías identificamos como galaxias suelen tener formas espirales, al igual que nuestra Vía Láctea o la vecina Galaxia de Andrómeda. Poseen un núcleo central del que emanan delgadas regiones espirales, o «brazos», rebosantes de estrellas. El aparente predominio de galaxias espirales se debe a que las formas arremolinadas se distinguen más fácilmente de las otras manchas de luz en el cielo nocturno. En realidad, las galaxias tienen numerosas morfologías, y la espiral no es el tipo de galaxia más abundante en el Universo.*

Tras decenios de esfuerzo, en la actualidad ya están prácticamente completos los inventarios de la parte del Universo en que vivimos. Lo que más abunda son las galaxias en forma de balones de rugby, llamadas oficialmente galaxias elípticas. Algunas son menos alargadas, acercándose más a la forma de una pelota de fútbol; otras parecen gruesos cigarros. Con independencia de la forma, cada galaxia elíptica alberga los habituales cien mil millones de estrellas, diseminados por extensiones de centenares de miles de años luz, pero está desprovista de brazos espirales. Las galaxias elípticas no parecen ser distinguidas, pese a tratarse de monumentales cúmulos de estrellas.

Los brazos espirales no son la única característica de que carecen las galaxias elípticas. Entre sus estrellas apenas flota gas y polvo; es decir, poseen poca o ninguna materia interestelar. Esto significa que todas las galaxias elípticas son viejas. Las estrellas, normalmente hechas de materia interestelar, se crearon hace muchísimo tiempo, sin dejar suelto gas ni polvo alguno para la formación continuada de futuras generaciones de estrellas. Los análisis de la radiación emitida por estrellas individuales de galaxias elípticas confirman que todas ellas son viejas. Resulta evidente que todo el gas y polvo interestelar quedó agotado hace mucho tiempo, sofocando el proceso de formación estelar.

La falta de gas, de polvo y de formaciones estelares en las galaxias elípticas contrasta marcadamente con la abundancia y la actividad de la materia interestelar en la segunda clase de galaxias: las espirales. Aquí también hay gran variedad de formas, aunque todas son básicamente discos aplanados que semejan pares de sombreros con las alas juntas. Algunas galaxias espirales tienen un gran núcleo central alrededor del cual se encuentran los brazos espirales, bastante apiñados. Otras exhiben unos brazos más abiertos que parten de una región central de tamaño intermedio. Y otras aún tienen un centro bastante pequeño del que emanan brazos largos y delgados que a veces es difícil reconocer como espirales.

* Otros autores dicen lo contrario: 80 % de las galaxias son espirales, el 17 % son elípticas y el restante 3 % son irregulares. Las espirales se presentan en todas las indicaciones, de frente, ladeadas y de perfil. (*Nota del Traductor.*)



Se sabe que las galaxias espirales contienen grandes cantidades de polvo y gas en los vastos espacios que rodean a sus estrellas. Además, observaciones de la última década demuestran que todavía se están formando estrellas, la mayoría en los brazos. A diferencia de las viejas galaxias elípticas, las espirales tienen una gran vitalidad. Esto no significa, sin embargo, que sean necesariamente jóvenes, sino más bien que son lo bastante ricas como para proveer a un continuado nacimiento de estrellas.

Existe un tercer tipo de galaxia, llamada galaxia irregular, que consiste en grandes acumulaciones de estrellas, gas y polvo cuya apariencia visual impide catalogarlas en ninguna de las dos categorías anteriores. En general, las irregulares suelen ser de menor tamaño que los otros tipos de galaxias. Algunos investigadores las llaman galaxias enanas, y en efecto, parecen empequeñecidas por las galaxias espirales o elípticas en cuya proximidad suelen encontrarse. De hecho, no hay pruebas de que existan galaxias irregulares aisladas en algún lugar del espacio; están in-

variablemente aliadas con una galaxia madre, de una de las otras dos categorías.

Nuestra Galaxia de la Vía Láctea está acompañada por dos pequeñas galaxias irregulares. Una es algo mayor que la otra, pero ambas son unas diez veces menores que nuestro sistema de la Vía Láctea. Es probable que giren en órbita alrededor de nuestra Galaxia, del mismo modo que la Tierra gira alrededor del Sol, o la Luna en torno a la Tierra. El movimiento de estas galaxias irregulares es lento según los patrones humanos, y sus trayectorias orbitales no han sido todavía firmemente establecidas.

Llamadas Nubes de Magallanes, por el navegante español del siglo XVI Fernando Magallanes, que en su viaje alrededor del mundo fue el primero en anunciar a las civilizaciones europeas del Hemisferio Norte la existencia de estas grandes aglomeraciones de luz, pueden observarse a simple vista y dan la impresión de ser nubes atmosféricas débilmente luminosas. Las Nubes de Magallanes han sido sin duda alguna fuente de admiración celeste para los habitantes del Hemisferio Sur desde el mismo amanecer de la civilización.

Nuestro planeta Tierra es finito; más allá se extiende la tenuidad del espacio interplanetario. Nuestro Sistema Solar es finito; más allá se encuentra el casi vacío del espacio interestelar. Tal vez la misma disposición de las galaxias en el espacio sea también finita. Se nos ocurre la pregunta: ¿Cómo están distribuidas las galaxias a través de las ingentes regiones del espacio? ¿Existe un límite a partir del cual ya no puedan ser observadas las galaxias? ¿O existen éstas por doquier, hasta los mismos límites del Universo observable?

Hay varias técnicas para determinar las distancias a que se encuentran las galaxias. Dentro del ámbito cercano de unos cuantos millones de años luz, sabemos que existen unas veinte galaxias. Gigantescas espirales como nuestra propia Vía Láctea y la de Andrómeda se extienden entre muchas enanas irregulares como las Nubes de Magallanes. Obviamente, estas veinte galaxias están agrupadas como consecuencia de su mutua atracción gravitacional: una versión mayor del mismo fenómeno natural que mantienen juntas a las estrellas de las galaxias, a los planetas de los sistemas estelares y a los habitantes de la Tierra. Estas veinte galaxias «locales» están dispuestas dentro de un volumen cuyo diámetro es aproximadamente de tres millones de años luz. Incluyendo a nuestra Vía Láctea, este conglomerado se conoce como el Grupo Local y constituye nuestra vecindad en el espacio.

Tres millones de años luz representan una extensión de tamaño respetable. Pero no nos dejemos confundir; aquí hay que

comprender dos cosas. Primero, reconocer que hemos dado de repente un gran salto en las dimensiones espaciales, desde las consideraciones anteriores sobre el tamaño de nuestra Vía Láctea, que es de cien mil años luz, hasta el tamaño del Grupo Local de Galaxias, que alcanza los tres millones de años luz. Segundo, reconocer que la Vía Láctea no está en el centro de esta agrupación de galaxias. No sólo la Tierra no es el centro de nuestro Sistema Solar, ni el Sol el centro de nuestra Galaxia, sino que tampoco nuestra Galaxia es el centro de este vasto Grupo Local. Aunque quizá nos hubiese gustado lo contrario, no ocupamos ningún lugar especial, único o privilegiado en este gigantesco y tal vez infinito Universo.

Podemos estar tranquilos; hay más de veinte galaxias en el Universo, muchas más. Fotografías con largas exposiciones, tomadas con grandes telescopios, revelan millares de galaxias en prácticamente cualquier pequeño campo de visión. En total, se estima que existen centenares de miles de millones de otras galaxias en el Universo observable.

Es interesante comprobar que todas las demás galaxias se encuentran mucho más lejos que incluso los miembros más distantes de nuestro grupo galáctico local. A cuatro millones de años luz del borde del Grupo Local no parece haber nada —ni galaxias, ni estrellas, ni gas, ni polvo, nada— sólo espacio intergaláctico vacío.

Intentemos imaginar las regiones del espacio profundo que hay más allá del Grupo Local. Tras recorrer un vacío aparentemente interminable, llegamos a un grupo de galaxias diseminadas. Pero hasta que hemos recorrido una distancia de cincuenta millones de años luz no encontramos un nutrido cúmulo de galaxias, un inconfundible volumen de espacio rebosante de ellas. A diferencia de nuestro Grupo Local, que sólo contiene veinte, este llamado Cúmulo de Virgo alberga aproximadamente a un millar. ¿Cómo imaginar mil galaxias individuales formando un cúmulo, cada una de las cuales alberga a unos cien mil millones de estrellas? No es de extrañar que los seres humanos —incluyendo a los astrofísicos— se confundan al contemplar la inmensidad de materia, espacio y tiempo del Universo.

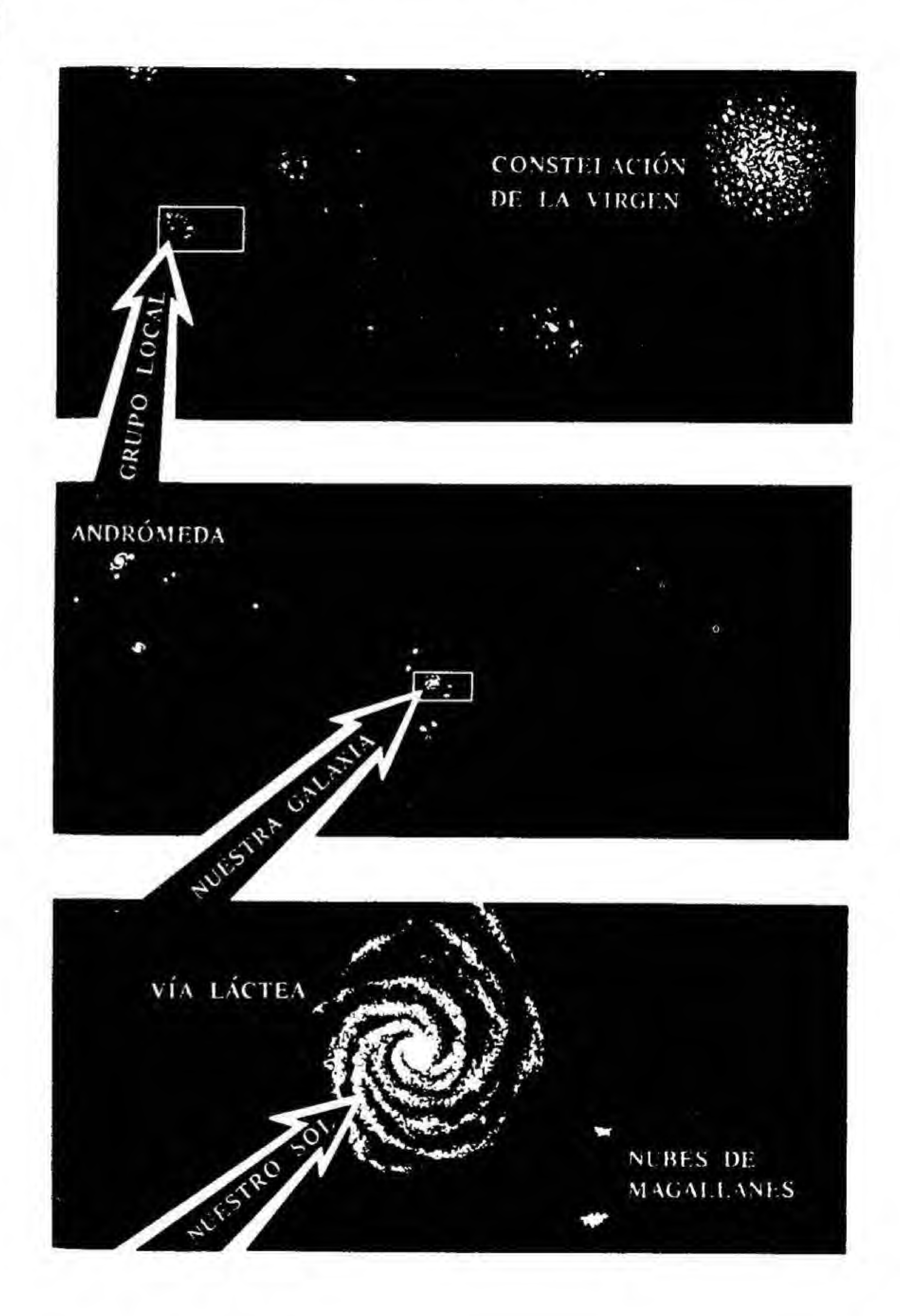
Cúmulos de galaxias como éste se hallan por doquier en el Universo. No son productos de nuestra imaginación; su presencia es un hecho. Del mismo modo que las galaxias son agrupaciones de estrellas, estos cúmulos son agrupaciones de galaxias y ocupan un rango muy elevado en la jerarquía de condensaciones de materia en el Universo: partículas, átomos, moléculas, polvo, planetas, estrellas, galaxias y ahora cúmulos de galaxias.

Cuando se contemplan grandes cúmulos de galaxias como el Virgo, con su millar de miembros, es difícil vencer la impresión de que deben producirse atascos de tráfico galáctico. Del mismo modo que hay colisiones entre los átomos encerrados en una caja o entre jugadores de hockey en un campo limitado, los movimientos casuales de las galaxias integradas en un cúmulo deberían provocar colisiones fenomenales entre tan gigantescas condensaciones de materia.

Y, en efecto, las galaxias colisionan. Considerables pruebas observacionales dan fe de que así es, y con mucha frecuencia. Numerosas fotografías celestes muestran a dos o más galaxias en el proceso de interacción. Mientras muchas galaxias parecen colocadas en la misma línea de mira, aunque en realidad están muy separadas entre sí, otras se hallan realmente cerca en el espacio. Es muy difícil determinar si se trata de una colisión o sólo de un estrecho acercamiento, ya que el movimiento apreciable de una galaxia remota emplea típicamente millones de años en completarse.

Cabría esperar que una colisión entre galaxias gigantes creara un terrible aplastamiento de materia, acompañado de explosiones espectaculares y grandiosos fuegos de artificio. Sorprendentemente, no ocurre así. De hecho, semejantes colisiones son bastante tranquilas: las estrellas de cada galaxia se deslizan más o menos entre las otras. ¿Por qué? Porque las estrellas casi nunca chocan; después de todo, son objetos pequeños a escala cósmica. Si bien disponemos de numerosas pruebas fotográficas directas de colisiones entre galaxias, nadie ha logrado jamás presenciar o fotografiar una colisión entre dos estrellas — ni siquiera en nuestra propia Vía Láctea.

Se puede explicar esta singularidad observando que las galaxias de un cúmulo típico están densamente apiñadas. La distancia entre las galaxias adyacentes del mismo cúmulo alcanza una media de un millón de años luz, lo cual es sólo unas diez veces el tamaño de una galaxia típica. Esto no les da mucho margen para moverse sin chocar entre sí. En cambio, las estrellas integradas en cualquier galaxia están diseminadas a mayores distancias. La media entre las estrellas de una galaxia es de unos cinco años luz, millones de veces mayor que el tamaño de una estrella normal. De ahí que las colisiones estelares sean extremadamente raras en una galaxia. Incluso cuando colisionan dos galaxias gigantes, la densidad de la población estelar se limita a doblarse, lo cual deja todavía a las estrellas un amplio espacio para desplazarse sin recibir grandes daños. El contenido estelar e interestelar de cada galaxia sufre sin duda algún cambio bajo las ma-



reas gravitacionales inducidas por las colisiones, pero no hay explosiones espectaculares. Las dos galaxias se deslizan de alguna manera a través de sus condensaciones respectivas sin causar demasiada conmoción.

Al completar nuestro inventario de la disposición de la materia en el espacio, llegamos a la siguiente pregunta obvia: ¿Existen condensaciones aún mayores en el Universo o están los cúmulos de galaxias en la cima de la jerarquía cósmica? Actualmente, los astrofísicos no están seguros. Existen indicios de agrupaciones de cúmulos galácticos, que forman titánicos supercúmulos, pero esta evidencia es en parte una conjetura y por ello objeto de considerable debate. De ser correcta, sin embargo, significaría que nuestro Grupo Local forma con otras condensaciones galácticas un supercúmulo de galaxias centrado cerca del gran Cúmulo de Virgo. Si existen, estos supercúmulos galácticos, alcanzarían dimensiones ingentes — del orden de varios cientos de millones de años luz de diámetro, o sea más de mil veces el tamaño de la Vía Láctea.

Pero no nos dejemos abrumar; recapitulemos un momento. Vivimos en el planeta Tierra. Nuestro planeta gira alrededor del Sol. El Sol es sólo una de los cientos de miles de millones de estrellas que existen en los suburbios de nuestra Galaxia. Y a su vez nuestra Galaxia es sólo uno de los muchos residentes del Grupo Local, que no pasa de ser un simple cúmulo de galaxias todavía mayor.

No parece haber nada especial acerca de nuestra Tierra, nuestro Sol, nuestra Galaxia y nuestro Grupo Local. Resulta evidente que la mediocridad es el único distintivo de todo ello.

Tal es nuestra hornacina o «nicho» en el Universo.

Los astrónomos han trazado un mapa de las galaxias normales hasta una distancia de aproximadamente cuatro mil millones de años luz. También se conoce la existencia de muchos objetos semejantes a galaxias más allá de este horizonte galáctico, pero son demasiado borrosos para poder asociarlos con cualquiera de las clasificaciones de galaxias normales. Más importante aún, el carácter básico de la mayoría de cuerpos distantes parece diferir del de los cercanos. En general, los cuerpos que distan más de cuatro mil millones de años luz son más «activos» y hasta cierto punto más violentos. La potencia emisora de estas galaxias activas, o radiogalaxias, es por doquier mucho mayor que la de las espirales y elípticas más próximas. Además, las galaxias activas emiten grandes cantidades de diferentes clases de radiación.

El adjetivo «normal», empleado para describir a las galaxias elípticas, espirales e irregulares, sirve para expresar que dichas galaxias emiten simplemente la radiación acumulada de numerosas estrellas. La mayor parte de la energía que emiten es del tipo visible, complementada por cantidades menores de ondas de radio, radiación infrarroja y ultravioleta y rayos X. Éste no es el caso de las radiogalaxias, que emiten con frecuencia enormes cantidades de energía de radio o infrarroja. Esta radiación es de hecho completamente invisible para nosotros, indetectable incluso mediante los mayores telescopios ópticos del mundo. Su presencia es captada y estudiada por radio y con ayuda de telescopios infrarrojos capaces de captar radiación invisible del espacio.

Así pues, la radioemisión de las galaxias activas es completamente distinta de la emisión de la radiación acumulada de miríadas de estrellas individuales. Para ser francos, todavía no sabemos si las radiogalaxias tienen estrellas.

La potencia anormal y el carácter extraño de los objetos astronómicos muy distantes sugieren que las primeras épocas del Universo fueron las más violentas. Recordemos que observar el espacio es mirar hacia atrás en el tiempo. Puesto que las condiciones físicas eran indudablemente distintas en épocas anteriores del Universo, no debería sorprendernos que los distantes objetos astronómicos formados hace muchos miles de millones de años difieran de los cercanos y recientes. Lo enigmático — por no decir asombroso — es la enorme cantidad de energía emitida por algunos de los cuerpos más potentes. Su emisión total de energía suele poner en aprietos a las teorías de la astrofísica.

Una estrella media, como por ejemplo nuestro Sol, emite en cualquier momento dado el equivalente de mil millones de bombas nucleares de un megatón. No sorprende que nuestra Galaxia sea cien mil millones de veces más potente, ya que, a fin de cuentas, contiene aproximadamente cien mil millones de estrellas. Pues bien, las radiogalaxias tienen generalmente una potencia mil veces mayor.

¿Alguien puede imaginar el equivalente de mil galaxias normales concentradas en un espacio habitualmente ocupado por una sola? Éste es el quid del problema que aparece al tratar de describir galaxias tan monstruosamente activas. Hubo un tiempo en que estuvo de moda sugerir que estos objetos eran escenario de espectaculares colisiones galácticas. Pero los cálculos indican que ni siquiera semejantes colisiones podrían producir energía en las cantidades requeridas.

El hecho de que las galaxias activas suelan emitir más radioondas y radiación infrarroja que óptica sugiere que estos objetos

son fundamentalmente distintos de las galaxias normales. Quizá ni siquiera deberíamos llamarlos galaxias.

Las características generales de emisión de las radiogalaxias pueden comprenderse tal vez invocando un fenómeno claramente no estelar. Llamado proceso del sincrotón, por el acelerador construido por el hombre para estudiar las partículas subatómicas, este mecanismo describe la emisión de radiación cuando partículas elementales cargadas interaccionan con campos de fuerza magnética. No interviene ninguna estrella ni existe ningún calor *per se*. La radiación surge simplemente de las regiones magnetizadas del espacio.

Es de suponer que el magnetismo lo impregna todo, no sólo la Tierra, el Sol y el Sistema Solar, sino también galaxias enteras. Aunque el campo de fuerza magnética en una galaxia típicamente difusa es varios miles de veces más débil que el de la Tierra, el magnetismo puede jugar aun así un papel importante, en especial cuando sus efectos abarcan toda una galaxia.

Experimentos de laboratorio han demostrado que cuando se inyectan partículas cargadas, en especial electrones, en un campo de fuerza magnética, giran en espiral como la aguja de una brújula lanzada al aire. El magnetismo presta lentitud a las partículas, provocando la transformación de algo de su energía cinética en energía radiante. La cantidad de radiación emitida en un solo encuentro entre un electrón y el magnetismo no es muy grande en el laboratorio. Pero en el caso de un gran objeto parecido a una galaxia, la radiación puede acumularse en vastas cantidades a causa del ingente número de encuentros con electrones. Además, la radiación emitida es a menudo de ondas de radio.

Dejando a un lado el proceso general, los detalles del mecanismo de emisión en el interior de las radiogalaxias continúan siendo problemáticos, incluso dando por hechas repetidas inyecciones de veloces y numerosos electrones. Aun así, el mecanismo del sincrotón nos da una idea del tipo de reacciones causantes de la emisión de tan ingentes cantidades de energía en radioondas. En conjunto, las observaciones de las galaxias activas indican una serie de explosiones que aceleran repetidamente a los electrones hasta velocidades próximas a la de la propia luz. Luego, en algunos casos, grandes masas de plasma se mueven hacia fuera, formando los distorsionados halos e ingentes burbujas que caracterizan a muchas de las radiogalaxias.

Cabe concluir que la teoría de la radiación del sincrotón debe ser capaz de justificar las emisiones observadas de radiogalaxias típicas, a condición de que no emitan durante mucho más de un

millón de años. Sin embargo, las radiogalaxias más violentas continúan siendo difíciles de explicar, la variabilidad de su radiación es casi imposible de comprender, el origen de sus repetidas explosiones es actualmente desconocido y la razón para la inyección de electrones de alta velocidad es sencillamente desconcertante.

Por muy peculiares que sean, las radiogalaxias no son los objetos más energéticos del Universo. Existe una clase adicional de objetos astronómicos activos extraordinariamente luminosos: objetos tan difíciles de imaginar que amenazan con invalidar las leyes de la física en su forma presente. Se trata de las fuentes cuasiestelares, de aspecto inocuo, muy distantes y de una potencia excepcional, llamadas quasars.

No contentos con emular las dificultades de emisión de energía de las radiogalaxias, los quasars las incrementan. La radiación óptica y de radio observada en los quasars ofrece a menudo variaciones de semana en semana, y a veces de día en día. La implicación es sencilla: las galaxias no podrían sincronizar nunca la emisión de sus dos extremos para producir variaciones de tiempo tan rápidas y coherentes. Expresado de otra manera, ningún objeto puede fulgurar en menos tiempo del que necesita la radiación para cruzarlo. Así, las variaciones de día a día significan que los quasars no pueden ser mucho mayores de un día luz, superando apenas el diámetro de nuestro Sistema Solar. La enorme potencia de los quasars, que suele ser de cien a un millón de veces mayor que la de nuestra Vía Láctea, debe originarse en una región diminuta según los patrones cósmicos.

Los mecanismos emisores de los quasars deben operar, por consiguiente, dentro de un espacio increíblemente reducido. ¿Cómo imaginar a cien o más galaxias normales apiñadas en una región no mucho mayor que el Sistema Solar? Ésta es una indicación del anómalo estado de cosas necesario para apreciar a los hercúleos quasars, sin lugar a duda los objetos más misteriosos de todo el Universo.

Independientemente de cómo emiten radiación desde las profundidades del espacio, las galaxias contribuyen poco al diseño arquitectónico universal. Están ahí esencialmente «para participar en el tíovivo», de modo parecido a los seres humanos, que contribuyen bien poco a la arquitectura global de la Tierra como planeta. Por otra parte, las galaxias pueden ser empleadas para investigar el marco del Universo, del mismo modo que los seres humanos pueden investigar la estructura de la Tierra. Las gala-

xias son como bolas de billar que se utilizaran para determinar la forma de la superficie de una mesa, o pelotas de golf que sirvieran para estudiar la superficie de un *green*. Los cosmólogos utilizan la radiación y los movimientos de galaxias distantes para descifrar la estructura del Universo. De hecho, los estudios de galaxias normales ya formadas y radiogalaxias son importantes para apreciar el ámbito global del Cosmos, como ya se ha mencionado en el Prólogo.

Igualmente importantes son los estudios del origen de las galaxias. ¿Cómo surgieron del Universo primitivo tan enormes condensaciones de materia, teniendo en cuenta que el Universo sólo consistía entonces en una mezcla de materia caliente y radiación intensa? ¿Acaso se forman las galaxias engullendo estrellas ya formadas, o se gestan las estrellas en galaxias ya hechas? ¿Qué apareció primero, las estrellas o las galaxias? Y otra pregunta: ¿cómo evolucionan las galaxias una vez formadas?

Por fortuna, estas y otras preguntas relativas a la Era de la Materia pueden contestarse con más seguridad que las referentes a los acontecimientos bastante confusos de la Era de la Radiación. No obstante, incluso aquí persisten importantes enigmas sobre los detalles del proceso de formación de las galaxias. Los científicos pueden afrontar el problema de identificar las dificultades principales, pero aún no están en situación de resolverlo por completo.

La falta de una buena comprensión de lo que observamos en las propias galaxias crea el enigma básico. Las galaxias pueden clasificarse de acuerdo con su morfología general y sus presupuestos totales de energía. Pero hoy día seguimos careciendo de una explicación para las propiedades observadas de todas las galaxias en términos, por ejemplo, de las sencillas leyes del gas que describen nuestro conocimiento bastante detallado de las estrellas. No es de extrañar que nos sea difícil imaginar cómo surgieron las galaxias cuando ni siquiera sabemos muy bien qué son.

Pese a ello, todas las galaxias tienen dos denominadores comunes, y la unión de estos factores puede ayudarnos a comprender los sucesos que originaron estos objetos, los más magníficos de todo el Universo.

En primer lugar, en la actualidad no parece estar formándose ninguna galaxia, y lo que es más, no parece haberse formado ninguna en los últimos diez mil millones de años. Y como todas las galaxias normales contienen algunas estrellas viejas, y todas las radiogalaxias están muy alejadas en el espacio (y por ende, en el tiempo), podemos concluir que todas las galaxias observables existen desde hace mucho tiempo. Cualquiera que fuese el mecanismo de formación, seguramente se hallaba ya extendido en las primeras partes de la Era de la Materia. Pero si las galaxias se

formaron tan prolíficamente en el Universo primitivo, ¿por qué ya no se forman ahora?

El segundo denominador común se deriva de la observación de que la mayoría de galaxias albergan comparables cantidades de materia. La capacidad de casi todas las galaxias individuales así medidas oscila entre mil millones y un billón de estrellas. Las galaxias normales parecen contener este número de ellas, mientras las radiogalaxias, siempre hasta donde se puede determinar, tienen el equivalente en materia. No hay galaxias conocidas de tamaño mucho menor, y ninguna de tamaño mayor. Todas parecen alojar a unos cien mil millones de estrellas, o su equivalente, igual que nuestra propia Galaxia de la Vía Láctea. ¿Por qué han de tener las condensaciones galácticas de la naturaleza tan reducido margen de tamaños? ¿Qué impide la construcción de galaxias que contengan, por ejemplo, mil billones de estrellas?

Para afrontar los interrogantes de la formación galáctica, imaginemos una gigantesca nebulosa de átomos de hidrógeno y helio colocada en un debilitado océano de radiación, algunas decenas de millones de años después del estallido inicial. Esta nebulosa gigantesca no llenaba todo el Universo, sino sólo un pequeño sector. Las condiciones físicas imperantes por aquel entonces estaban cambiando rápidamente. La temperatura y la densidad universal habían descendido de modo considerable con el comienzo de la Era de la Materia. La radiación ya no era lo bastante intensa como para descomponer la materia atómica. De hecho, los átomos totalmente formados de hidrógeno y helio eran ya lo bastante numerosos como para ejercer una influencia colectiva propia. Fuerzas electromagnéticas y nucleares unían las partículas elementales del interior de los átomos, mientras la gravedad unía a los átomos dentro de la nebulosa gigantesca. Todas las fuerzas conocidas que ahora dirigen la evolución de la materia ya operaban entonces con capacidad suficiente para dar a la nebulosa cierta integridad propia. Vastas parcelas de materia empezaban a distinguirse de otros segmentos, un estado de cosas que contrastaba fuertemente con la magnífica y caótica violencia de la anterior Era de la Radiación.

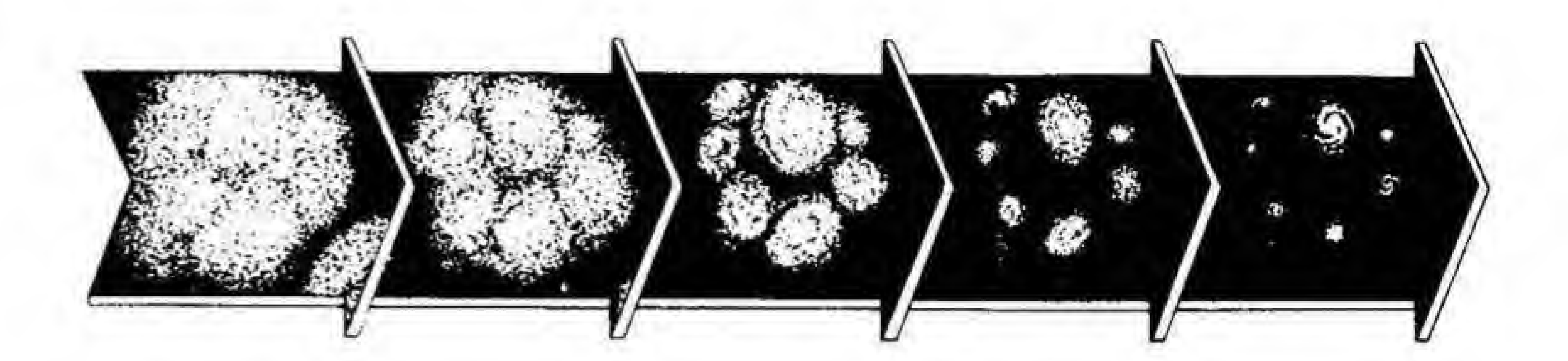
Pese a esta estabilidad, la nube inicialmente homogénea debió sufrir fluctuaciones ocasionales, pequeñas irregularidades locales en la densidad del gas, que iban y venían al azar. Ninguna nube, ya sea una esponjosa variedad de la atmósfera terrestre, la tenue variedad interestelar de nuestra Galaxia o la nebulosa primaria mencionada aquí como parte del primitivo Universo en expansión, puede permanecer indefinidamente homogénea. Cada átomo de la nebulosa ha de hacer algún movimiento, en gran parte

a causa del calor. Un átomo de su interior puede moverse accidentalmente en dirección a otro, haciendo aquella parte de la nebulosa un poco más densa que el resto. Luego los átomos pueden separarse, dispersando esta fluctuación de la densidad, o pueden actuar en unión para atraer a otro átomo, con lo que la densidad aumenta. Así pueden surgir en cualquier parte de la nebulosa pequeñas bolsas de gas, en virtud de movimientos atómicos fortuitos. Cada bolsa es una condensación temporal en un medio altamente enrarecido. Semejantes fluctuaciones de la densidad pueden causar además la fragmentación de la nebulosa, en pequeños cúmulos. Todo este proceso tiene cierta similitud con las ondulantes nubes de una tormenta terrestre, que concentran y luego dispersan la humedad.

Tras algunos incrementos de la densidad, causados por la atracción de más y más átomos, los pequeños cúmulos podrían convertirse en agrupaciones de materia del tamaño de las galaxias. Los cálculos teóricos apoyan la idea de que semejantes fluctuaciones accidentales de gas pudieron ser las precursoras —protogalaxias— de las galaxias actuales. Pero — y este pero es importante— estos mismos cálculos sugieren que, a este ritmo, las galaxias todavía se estarían formando en la actualidad. Sin embargo, como ya hemos visto, los astrofísicos no tienen ninguna prueba de que ahora se estén formando galaxias; no han encontrado regiones peculiares sorprendidas en el acto intermedio entre galaxias ya completas y el vacío intergaláctico.

Se requiere muchísimo tiempo —casi veinte mil millones de años— para que los suficientes átomos moviéndose al azar se amalgamen en una gran bolsa de gas que pueda llamarse con propiedad una protogalaxia. Este largo tiempo requerido no es sorprendente si se tienen en cuenta las cantidades verdaderamente ingentes de átomos integrados en una galaxia: cien mil millones de estrellas por galaxia, aproximadamente, a razón de unos mil millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones (10^{54}) de átomos por estrella: alrededor de cien millones de billones de billones de billones de billones de billones de átomos en una galaxia normal. Esto equivale a 10^{68} átomos en notación científica, obviamente una terrible cantidad de átomos, cualquiera que sea la notación empleada. Por consiguiente, la naturaleza se toma mucho tiempo para hacer las cosas al azar.

Así pues, pese al hecho de que ciertos incrementos casuales en un gas normalmente homogéneo podrían haber llegado a producir galaxias, no es probable que las galaxias visibles ahora se originaran estrictamente de este modo. Aun así, la idea de que el gas se volviera heterogéneo de modo espontáneo sigue teniendo vigor porque se trata de un proceso razonablemente bien com-



prendido que no requiere fuerzas desconocidas ni condiciones únicas.

El problema de la formación galáctica es actualmente arduo para los astrofísicos. Su solución ha exasperado a muchas mentes brillantes. El origen de las galaxias atrae a los teóricos de imaginación fértil, y en especial a quienes no se asustan ante la posibilidad de llegar a conclusiones poco ortodoxas. Se trata de una de las áreas astronómicas más difíciles de apreciar, porque se conocen muy pocos hechos sobre las galaxias y menos todavía sobre los mecanismos físicos que las formaron hace muchísimo tiempo.

Sin embargo, hay un hecho incontestable: que las galaxias existen, y además, en gran abundancia. De alguna manera, surgieron en el espacio. Consideremos, pues, con mayor detalle algunos de los mecanismos específicos de la formación de galaxias recientemente propuestos por los teóricos.

Algunos investigadores han adoptado un punto de vista radical y argüido que tal vez las estrellas se formaron antes, tras lo cual se agruparon para fabricar las galaxias. En su opinión, las galaxias no se crearon según la hipótesis tradicional de heterogeneidades casuales en la mezcla de gas-radiación de la primitiva bola de fuego cósmica. En su lugar, proponen que las galaxias se originaron mucho más tarde por la agregación de estrellas, un modelo conocido generalmente con el nombre de agrupación gravitacional. Así pues, esta proposición no ortodoxa sugiere que las galaxias podrían efectivamente estar formándose en la actualidad, pero en parte a partir de estrellas viejas formadas hace miles de millones de años.

Según esta teoría, primero se formaron los planetas y después las estrellas a partir de primitivas fluctuaciones de gas presentes en los primeros años de la Era de la Materia. Se trataba de irregularidades gaseosas dentro de una bola de fuego completamente homogénea que se enfriaba con rapidez. Una vez formadas las estrellas, la gravedad las agrupó, dando origen a los cúmulos estelares. Estos cúmulos emigraron para formar las galaxias,

tras lo cual se crearon sucesivamente los cúmulos y los supercúmulos galácticos.

El atractivo de esta hipótesis reside en su orden jerárquico: todos los cuerpos grandes son sucesivamente construidos a partir de los pequeños. Esta clase de estructura material es exactamente contraria al colapso material previsto si el Universo se contrajera en el futuro. Pero aparte de esta agradable simetría teórica, el concepto está plagado de problemas prácticos.

Una de las dificultades de la hipótesis de la agrupación gravitacional es —debemos repetirlo— que no hay pruebas de que se estén formando galaxias en la actualidad. Si de verdad ocurriera, podríamos observar cuerpos de una morfología situada entre galaxias bien definidas y el espacio vacío, y no conocemos ningún cuerpo amorfo e indefinido. Además, las regiones ubicadas más allá de los cúmulos galácticos —el medio intergaláctico— no parecen contener mucha materia. Cuandoquiera y comoquiera que se formaran las galaxias, lo hicieron por lo visto con gran eficiencia, absorbiendo casi todo el material disponible y no dejando nada atrás para agrupaciones ulteriores. Sólidos argumentos teóricos indican además que ahora deberían estar formándose estrellas en el interior de las galaxias. Estos argumentos fueron ampliamente verificados en la pasada década por espléndidas observaciones desde puntos muy distantes de nuestra propia Vía Láctea, donde se sabe que ahora se están formando estrellas, lenta pero constantemente, a partir del caldo galáctico de gas y polvo. Otro problema es la casi imposibilidad de imaginar la formación de planetas antes de la formación de estrellas. Esto es especialmente cierto si, como parece razonable, los elementos pesados, incluidos los planetas, son sintetizados en los núcleos de las estrellas. Es casi seguro que las estrellas originales precedieron a los planetas originales.

El quid de la cuestión es que de las observaciones del espacio se deduce que lo más probable es que en la actualidad se estén formando estrellas, pero no galaxias. La mayoría de argumentos contemporáneos y todos los datos modernos apuntan hacia la idea de que la formación de las galaxias ocurrió en primer lugar, y que fue seguida de la formación de estrellas y planetas dentro de aquellas galaxias.

Reacios a aceptar hipótesis ligeramente radicales como la agrupación gravitacional de las estrellas o hipótesis extremas según las cuales las galaxias se crean por la expansión de cuerpos pequeños y densos, la mayoría de astrofísicos actuales apoyan alguna versión del concepto de fluctuaciones casuales de gas tratado más arriba. Recordemos que la teoría sugiere la existencia

de estas fluctuaciones, pero que su crecimiento habría sido demasiado lento para fabricar galaxias antes de ahora. El problema podría tener solución si se descubriera la manera de acelerar su crecimiento, y una de ellas es dar por sentado que el Universo fue muy turbulento en sus comienzos.

La turbulencia fue probablemente un factor importante en el Universo primitivo. Por turbulencia nos referimos a la inevitable «confusión» o movimiento desordenado de la materia (el gas) en un medio de rápida evolución (el Universo). Todos los átomos existentes en el interior de las vastas nubes primarias se pusieron en movimiento, no sólo por la expulsión del estallido inicial, sino también por el calor de la bola de fuego. Entonces el gas tenía cierta energía cinética «dirigida» hacia fuera por la ordenada expansión del Universo. Tenía además una energía cinética «no dirigida» accidental, como consecuencia del desorden reinante en el llameante infierno. Surgieron sin duda aquí y allá intactas bolsas de gas que iniciaron giros desenfrenados junto con las agitaciones individuales de cada uno de los átomos. La turbulencia ayudó en particular a impeler estos remolinos hacia lugares donde las fluctuaciones de la densidad ya se habían establecido en el Universo primario.

Se pueden observar turbulentos remolinos de esta clase contemplando el agua que sale por el desagüe de la bañera. Hay ejemplos todavía mejores, como mover suavemente la mano a través del agua, o una cucharilla en la taza de café; esta pequeña turbulencia produce remolinos.

Es probable que los mejores ejemplos de turbulencia se encuentren en las esponjosas nubes de la atmósfera terrestre. Especialmente claros en fotografías tomadas desde arriba por satélites orbitando la Tierra, estos remolinos kilométricos se ven como intensificaciones del gas atmosférico y son más pronunciados cuando las corrientes de aire se vuelven especialmente turbulentas. Si crecieran, acumulando en este caso cantidades adicionales de humedad, los remolinos podrían originar huracanes de centenares de kilómetros de extensión. Algunos lo hacen, aunque por fortuna para nosotros con muy poca frecuencia.

Así pues, aquí tenemos un caso en que los estudios de un fenómeno terrestre —el tiempo atmosférico de la Tierra— puede ayudarnos a comprender uno de los problemas extraterrestres más discutidos. Los huracanes planetarios reproducen a *grosso modo* la morfología global, la forma de hojuela, la rotación diferencial y la concentración de energía en el interior de las galaxias espirales. Estas semejanzas sugieren que quizá podamos aprender algo sobre la formación de las galaxias mediante el estudio de la formación de huracanes. En particular, ya que la mayoría de meteorólogos están de acuerdo en que se requiere una

especie de «preparación» turbulenta para iniciar un huracán, las primeras fases de dichas tormentas podrían ser utilizadas por los astrónomos para obtener alguna clave sobre las escurridizas fluctuaciones de densidad que originaron las protogalaxias en el Universo primitivo.

Pese al constante enfriamiento causado por la expansión universal, cada remolino localizado en una gran nube de gas ha de empezar a calentarse. No puede evitarlo. Los remolinos no son sólo lugares de turbulencia, sino también de un calor progresivo dentro de una nube que se está enfriando. El calor resulta de la fricción causada por las frecuentes colisiones entre los grupos de átomos cada vez más densos de cada remolino. No difiere mucho del calor que generamos frotándonos las manos en un gélido día de invierno.

Los remolinos individuales han de desprenderse, antes o después, de un poco de esta energía recién adquirida, del mismo modo que el Sol o cualquier otro cuerpo calentado necesita descargar energía para no explotar. Los remolinos de la nube protogaláctica lo hacen irradiando su calor. De este modo, una gran nube que contiene muchos remolinos puede enfriarse todavía más rápidamente que una nube homogénea cualquiera del Universo en expansión. Al enfriarse, la nube se contrae un poco, incrementando así la densidad y por ello el calor reinante dentro de los torbellinos. Los torbellinos individuales y la nube entera irradian simultáneamente hacia el espacio esta energía recién adquirida, permitiendo con ello una nueva contracción de la nube madre y de los torbellinos individuales. Este ciclo de contracción, calentamiento, irradiación, enfriamiento y contracción se repite una y otra vez, operando a diferentes velocidades en cada remolino, en particular porque algunos remolinos son más efectivos que otros a la hora de absorber gas de la nube nodriza.

Es fácil imaginar un cúmulo de galaxias que se formen de esta manera, con cada remolino convirtiéndose en galaxia miembro del cúmulo. Pero tal vez sólo una o muy pocas galaxias se forman en el interior de las vastas nebulosas primarias del Universo primitivo, tras lo cual la gravedad empuja gradualmente a las galaxias hacia los cúmulos galácticos, de unas magnitudes inimaginables, que ahora vemos diseminados por todo el abismo.

Por bonito que parezca este esquema de la formación galáctica, tropieza con algunos problemas en cuanto se le aplican las matemáticas. Pueden hacerse cálculos detallados de la cantidad de tiempo requerido para que estos remolinos individuales de gas se contraigan hasta formar objetos parecidos a galaxias. Aquí surge la primera dificultad. El tiempo requerido para la coagulación y contracción del gas en un remolino turbulento es mayor que el tiempo empleado en la disipación casual de dicho remolino. En otras palabras, puede pronosticarse la dispersión de los remolinos antes de que tengan una posibilidad real de coagularse densamente. Los remolinos turbulentos intensifican las fluctuaciones casuales de gas, pero no duran lo suficiente para formar galaxias.

Así pues, cualquier clase de remolino va y viene de un modo arbitrario. Aparecen, desaparecen y vuelven a aparecer en diferentes partes, ya sea una nube atmosférica terrestre de aire húmedo, ya sea una nube galáctica extraterrestre de gas primordial. De vez en cuando, un remolino terrestre consigue convertirse en un furioso huracán, o un remolino extraterrestre en una galaxia completa. Pero la conocida rareza de su crecimiento rápido sugiere que los remolinos turbulentos no pueden ser la única solución del problema de la formación de galaxias o cuerpos similares.

Como ya hemos mencionado, la mayoría de investigadores contemporáneos evitan las teorías radicales de la formación galáctica y prefieren trabajar con el concepto básico de fluctuaciones casuales de gas. Pero es preciso encontrar algún mecanismo que acelere el crecimiento de tales fluctuaciones en un Universo primitivo que se enfría y diluye progresivamente. El problema se centra, pues, en otros sistemas que pudieran haber intensificado el crecimiento de las fluctuaciones de gas. Durante años, los teóricos modernos han intentado resolver este problema sin lograrlo realmente. La formación galáctica es desde luego un hueso duro de roer.

El esquema general aprobado ahora por los astrónomos postula que el Universo primitivo no era perfectamente homogéneo, sino que estaba salpicado, incluso al principio de la Era de la Materia, de considerables fluctuaciones de densidad. Posteriormente, estas bolsas de gas ya formadas se habrían hinchado durante la época galáctica para fabricar al menos los contornos básicos de las galaxias actuales. Se considera que el mecanismo aceptado de formación galáctica es el familiar ciclo (inducido por la gravitación) de contracción, calentamiento, radiación, enfriamiento y eventual aplanamiento en cuerpos con forma de disco. Es significativo que la presencia de fluctuaciones en la densidad del gas hacia el final de la Era de la Radiación acelere el proceso y abrevie el tiempo de formación. Sin embargo, a fuer de sinceros hemos de decir que una Era de Radiación no homogénea deja un mal sabor de boca en algunos investigadores.

Gran parte de la fascinación experimentada por los investigadores que estudian la formación de las galaxias se deriva del hecho de que no se puede probar la incorrección de muchas de las

teorías. Numerosas ideas son posibles cuando no existen datos experimentales que las desautoricen. Los que conocen a fondo las sofisticadas matemáticas de estudios notoriamente intrincados como la mecánica de los fluidos, la física turbulenta y la magnetohidrodinámica justifican sus intereses trabajando con el problema de la formación de las galaxias. No obstante, pese a considerables esfuerzos dedicados durante los dos últimos decenios a desvelar los secretos de esta formación, los datos específicos de un proceso plausible no han podido ser descubiertos.

Cualquiera que haya podido ser el proceso de formación de las galaxias, este mismo proceso o una evolución posterior condujo a la creación de las miríadas de galaxias que ahora observamos. Hay galaxias espirales dispersas y tupidas, con una mezcla de estrellas nuevas y viejas. Hay galaxias elípticas grandes y pequeñas que sólo contienen estrellas viejas. Y hay radiogalaxias irregulares y explosivamente activas, además de los misteriosos quasars, que tal vez no alberguen ninguna estrella.

Ante semejante parque zoológico de objetos galácticos y seudogalácticos es natural preguntarse si habrá alguna pauta general o esquema evolutivo que interrelacione los diversos tipos de galaxias. La respuesta es que no hay ninguna conocida. No existe una operación física conocida que caracterice a todas las galaxias.

Algunos investigadores sugirieron hace mucho tiempo una progresión evolutiva de las galaxias que se iniciaría con las elípticas casi esféricas, convertidas posteriormente en elípticas planas, transformadas más tarde en espirales cerradas y después abiertas, y culminando finalmente en galaxias irregulares. Aquí la idea central es que las galaxias empiezan con una forma más o menos esférica y, a medida que envejecen, su rotación tiende a aplanarlas, produciendo primero cierta elipticidad, y después, gradualmente, unos brazos espirales, para acabar dispersándose en viejas galaxias irregulares. Este tipo de hipótesis evolutiva requiere que todas las galaxias elípticas sean jóvenes y todas las irregulares, viejas. Pero éste no es el caso en absoluto. La observación del espacio nos enseña que las galaxias elípticas no son jóvenes, sino viejas, han agotado casi todo el gas y el polvo interestelar y no dan muestras de ninguna formación estelar activa.

Podemos argüir por otra parte que si las elípticas son galaxias indudablemente viejas, quizás ocurra que el esquema evolutivo progresa en sentido contrario. Tal vez las irregulares son jóvenes y después de formarse, se convierten gradualmente en elípticas. Es fácil imaginar galaxias espirales dispersas contrayéndose en espirales más tupidas y a la postre en galaxias elípticas. Pero también aquí abundan las dificultades. Aparte del obvio problema de comprender cómo las hermosas galaxias espirales podrían haber partido de distorsionadas galaxias irregulares, subsiste la necesidad de reconciliar esta teoría con la abundancia de estrellas viejas en las galaxias irregulares y las espirales dispersas. Dicho en términos sencillos: Si las galaxias irregulares y las espirales dispersas son el punto de partida de un esquema de evolución galáctica, entonces ambos tipos deberían ser jóvenes. Pero no lo son. Prácticamente todas las irregulares y espirales contienen una mezcla de estrellas viejas y nuevas. La existencia de estrellas viejas no concuerda con la naturaleza de una galaxia joven.

La conclusión es que probablemente las galaxias normales no evolucionan de un tipo a otro. En realidad, las espirales no parecen elípticas con brazos, ni las elípticas, espirales sin brazos. No hay relaciones hereditarias conocidas entre las galaxias normales. Al parecer, su ordenamiento es resultado exclusivo de las condiciones físicas existentes en las nubes de gas donde se crearon hace más de diez mil millones de años.

Un vínculo evolutivo entre las galaxias normales y las radiogalaxias parece más verosímil, aunque siga siendo discutible. Una secuencia de tiempo que progrese de quasars a radiogalaxias y a galaxias normales implica una hilera continua de objetos cósmicos. Los objetos adyacentes en esta secuencia apenas se distinguen entre sí. Por ejemplo, los quasars débiles tienen algunas cosas en común con ciertas radiogalaxias muy activas, mientras que las radiogalaxias más débiles se parecen con frecuencia a las galaxias normales más explosivas. Es posible que todos los objetos de tamaño galáctico empezaran como quasars hace más de diez mil millones de años, tras lo cual fueron perdiendo su potencia emisora y se convirtieron primero en radiogalaxias y finalmente en galaxias normales.

Esta idea estipula que los quasars observados son en realidad antepasados de todas las demás galaxias. Demasiado distantes de nosotros para que veamos alguna estrella, los quasars son sólo detectables a causa de sus regiones centrales tremendamente energéticas. A causa de su enorme distancia, los percibimos tal como fueron en un tiempo remotísimo, en su radiante juventud. Cuando la actividad central decrece con el tiempo, los quasars asumen formas más parecidas a las de las galaxias familiares y cercanas. De ser probada esta teoría, incluso nuestra Vía Láctea fue en un tiempo un brillante quasar.

Aunque atractiva, esta hipótesis evolutiva de quasar a radiogalaxia y a galaxia normal tiene sus defectos. Algunos investiga-



dores alegan que no existe ningún vínculo evolutivo. Sugieren que los potentes quasars son simplemente manifestaciones extremas de los fenómenos explosivos observados en prácticamente todas las galaxias. Después de todo, incluso el centro de nuestra Vía Láctea expele materia y radiación. Lo mismo puede decirse de los quasars y radiogalaxias, aunque a una escala mayor. Quizá todos estos cuerpos son parte de una misma familia en la que no existe ninguna secuencia evolutiva que vincule a todos sus miembros, del mismo modo que no hay transformación evolutiva entre las diferentes razas de nuestra especie humana. Cada tipo de galaxia o raza humana es claramente distinto. Una raza de seres humanos no evoluciona hasta convertirse en otra, y ningún tipo de galaxia tiene que evolucionar necesariamente en este sentido. Tal vez son todas galaxias corrientes que se formaron hace mucho tiempo, y algunas están dotadas de regiones centrales especialmente explosivas. Estas últimas, más brillantes que las otras por alguna razón desconocida, se llaman quasars, mientras que las incapaces de producir explosiones se llaman galaxias normales. Se ignora por qué los quasars explotan más a menudo y con más violencia. Es de suponer que la respuesta yace enterrada en los centros relativamente desconocidos de las galaxias.

Al parecer, la futura investigación dirigida hacia los centros de las galaxias será una gran ayuda en la tarea de descubrir los secretos de estos gigantescos cuerpos cósmicos. Hasta el presente no se ha podido descubrir si todas las galaxias cambian de un tipo a otro, o si algunas experimentan repetidas explosiones pero continúan perteneciendo al mismo tipo de objeto no evolucionado.

Es obvio que nuestro conocimiento de las galaxias, en especial de su origen y evolución, resulta insuficiente. Cómo llegaron a donde están, dotadas de su forma peculiar y energía prodigiosa, es todavía un misterio. El problema aumenta si tenemos en cuenta que los astrónomos no pueden encontrar ninguna galaxia en formación. Además, aunque las galaxias evolucionaran, sus cambios serían tan lentos en comparación con el período de tiempo transcurrido desde que nuestra civilización tecnológica empezó a estudiarlas, que nos resultarían imperceptibles.

El origen y la evolución de las galaxias plantean más problemas que la formación de las estrellas, a las que podemos observar; que la evolución de las estrellas, que podemos identificar; que el origen de la vida, con el que podemos experimentar en nuestros laboratorios; que la evolución de la vida, que podemos estudiar en acción; que los orígenes de la inteligencia, cultura y tecnología, que podemos estudiar por medio de fósiles desenterrados de los profundos estratos de escombros antiquísimos. Prácticamente todo lo discutido en este libro se asienta sobre terreno más firme que el origen y la evolución de las galaxias. De hecho, el tema de la formación galáctica es el mayor eslabón perdido en el esquema de la evolución cósmica.

Sin embargo, las galaxias son muy importantes. Aparte de la creación de átomos, la formación de las galaxias fue la primera gran realización de la Era de la Materia. Hasta que averigüemos muchas más cosas sobre ellas, nuestra comprensión de la evolución cósmica continuará siendo incompleta e insatisfactoria.

ÉPOCA TERCERA

LAS ESTRELLAS

FRAGUAS DE ELEMENTOS



miles de millones de años

Las estrellas son bolas de gas, tenues y calientes en el exterior, y densas y aún más calientes en el interior. Exceptuando su forma, no se parecen en nada a los planetas, duros y rocosos. Las estrellas normales son enormemente mayores y muchísimo más calientes que los planetas, y experimentan cambios de un modo totalmente distinto. No tienen una verdadera superficie, y mucho menos materia dura y sólida como la de la Tierra. Las estrellas están simplemente compuestas de gas diperso mantenido constante por la implacable fuerza de la gravedad.

Esta misma gravedad obliga al gas a tomar la configuración geométrica más sencilla posible: una esfera. Dondequiera que domine la gravedad, obliga a la materia a adoptar una forma esférica. Todos los planetas, estrellas y lunas son esferas.

La gravedad no es la única fuerza que opera en las estrellas. De lo contrario, la compresión ejercida por esta poderosa fuerza las encogería hasta un tamaño tan reducido que no podrían emitir calor ni luz. Compitiendo con la gravedad en una estrella está la presión del gas calentado. Esta presión empuja hacia fuera, tratando de dispersar la estrella en el espacio. El resultado es un equilibrio, o condición estable: la gravedad hacia dentro, la presión hacia fuera. Tal es la sencilla condición de cualquier estrella.

La que conocemos mejor se llama Sol.

Las estrellas son cuerpos astronómicos interesantes por muchas razones, aunque hay dos principales. La primera es senci-

lla: las estrellas son los hornos donde se forjan los elementos pesados. Sin éstos, nada de lo que nos rodea — suelo, aire, la Tierra — podría existir.

En segundo lugar, las estrellas desempeñan un papel esencial en el calentamiento y la iluminación de los planetas cercanos. En el caso de nuestro propio Sistema Solar, por ejemplo, la energía del Sol es un factor crucialmente importante que no sólo promovió la aparición de la vida en la Tierra, sino que también proporciona la luz y el calor necesarios para el mantenimiento continuado de dicha vida. El Sol, más que ninguna otra cosa, hace de la Tierra una morada razonablemente cómoda. Sin una estrella cercana, la vida tal como la conocemos no podría existir.

Las estrellas son, pues, enormemente importantes en la evolución de la materia y de la vida. Resulta evidente la trascendencia de comprender cómo, cuándo y dónde se originan y evolucionan las estrellas.

Y por último, las estrellas también pueden ayudarnos a comprender una de las cuestiones más fundamentales: los enigmáticos acontecimientos en aquel singular punto de materia supercaliente y superdenso del que surgió el Universo. Se cree que los cadáveres abrasados de estrellas grandes, conocidos popularmente como agujeros negros, reproducen más que cualquier otro objeto astronómico las violentas condiciones que prevalecieron en el mismo inicio del Universo. De modo que también es importante comprender cómo, cuándo y dónde mueren las estrellas.

Los astrofísicos saben muchas cosas sobre el nacimiento, la existencia y la muerte de las estrellas, sobre cómo pasan por fases de juventud, madurez y vejez. Aunque aparecen inmutables en el cielo nocturno, las estrellas cambian de aspecto al pasar por sus ciclos de vida. Algunas son jóvenes, otras, viejas. Otras han desaparecido hace mucho tiempo. Tras haber agotado su gas. Y otras aún tienen que formarse del caldo interestelar de gas y polvo. Nosotros no nos percatamos de estos cambios porque los ciclos vitales estelares son astronómicamente largos en comparación con la duración de la vida humana.

El origen de las estrellas es de una importancia científica fundamental. Hay pocas cosas más básicas que el nacimiento de una estrella. ¿Conocen realmente los astrofísicos todos los pasos necesarios para la formación de una estrella normal? ¿Podemos describir las sendas evolutivas específicas de las heterogeneidades interestelares que producen las estrellas? Preguntas como éstas se están contestando ahora. Las soluciones no son todavía

del todo claras, pero se ha hecho un notable progreso en el último decenio. Actualmente, los conocimientos de la formación estelar son una mezcla de intuición teórica y hechos probados.

La época estelar ofrece una mejor descripción de la materia que la anterior época galáctica. Los argumentos sobre la inestabilidad gravitacional, invocados con éxito parcial en el caso de las galaxias, son más útiles para comprender la formación de las estrellas existentes en el interior de dichas galaxias, cualquiera que fuese el origen de éstas. Como en el caso del Universo primitivo, fluctuaciones accidentales pueden ocurrir en diversas partes de una gran nebulosa de gas situada dentro de cualquier galaxia ya formada. Aunque estas fluctuaciones resultaron insuficientes por sí mismas para aportar las enormes cantidades de materia requeridas para formar galaxias, cálculos teóricos indican que este proceso debería ser eficaz en la formación de las estrellas, que necesitan menores cantidades de materia. Los remolinos existentes en el espacio interestelar son más fríos y densos que los de la bola de fuego primitiva, y por lo tanto más adecuados para reunir la materia requerida para la formación de estrellas individuales o grupos de estrellas. En general se cree que las estrellas se forman cuando se ha acumulado materia suficiente en una bolsa galáctica, tras lo cual se contrae, se calienta y acaba encendiendo un fuego nuclear interno.

Los astrofísicos han construido intrincados modelos de las fases por las que pasan las nubes de gas antes de convertirse en verdaderas estrellas. Estos modelos estelares son en esencia «experimentos numéricos» realizados con ayuda de grandes computadoras de alta velocidad. Para la época estelar, los factores computados incluyen gravedad, calor, rotación, magnetismo, reacciones químicas, abundancia de elementos naturales y otras condiciones físicas que caracterizan a una nebulosa interestelar en contracción. Estos factores son como los ingredientes de una complicada receta culinaria. En este caso, la receta es matemática, y rebosa de ecuaciones complejas. Al igual que en las culinarias, se conocen los tipos de ingredientes, pero aquí las cantidades de cada uno son inciertas.

Las grandes computadoras construidas durante la década de los años setenta permiten a los teóricos el uso de un procedimiento basado en la eliminación de errores para este problema polifacético — a fin de asegurar el éxito de la receta. Aunque las computadoras no hacen más que masticar números, pueden realizar esta tarea básica con mayor rapidez que los humanos, dosificando los numerosos ingredientes mientras mantienen la consistencia entre las predicciones teóricas y las observaciones de las miríadas de estrellas presentes en nuestra Galaxia.

Se ignora el grado de precisión de estos modelos estelares porque es muy complicado dar el tercer paso del método científico y ponerlos a prueba experimentalmente. Desde luego, nadie ha visto desfilar jamás una nube interestelar o una verdadera estrella a lo largo de sus diversas fases evolutivas. La vida de un ser humano, o incluso de nuestra entera civilización hasta el momento presente, es mucho más corta que el tiempo necesario para que una nube se contraiga y forme una estrella. Teniendo en cuenta que se requieren unos treinta millones de años (alrededor de un millón de generaciones humanas) para confeccionar una estrella como nuestro Sol, nadie puede esperar con espíritu realista la ocasión de asistir al espectáculo del nacimiento de un cuerpo celeste.

Sin embargo, nuestros modelos no carecen del apoyo que presta la observación. El examen telescópico de diversas nubes de gas en diferentes estadios de su evolución ayuda a perfeccionar nuestra comprensión general de la formación estelar. La moderna tecnología permite a los experimentadores estudiar nubes interestelares y estrellas nacientes en busca de detalles sobre su desarrollo embrionario. El estudio de estas nubes interestelares, situadas a menudo en lugares de nuestra Galaxia no relacionados entre sí, ha facilitado a los astrofísicos la comprensión de muchos estadios importantes de la evolución preestelar.

Los actuales esfuerzos de los astrofísicos recuerdan a los de los arqueólogos y antropólogos, que desentierran artefactos o huesos en numerosos puntos de la superficie terrestre que no guardan relación entre sí. Al no haber tenido oportunidad de vivir en tiempos de nuestros antepasados, esos estudiosos de la Tierra analizan los innumerables restos en un intento de imaginar el cuadro de la evolución humana. De modo similar, los estudiosos del espacio observan diversos objetos de nuestra Galaxia, sin relación aparente entre sí, tratando de hallar el lugar de cada uno de ellos en el esquema general de la evolución estelar. Los huesos terrestres y las estrellas extraterrestres se parecen mucho a las piezas de un rompecabezas. El dibujo se verá con claridad cuando todas las piezas hayan sido encontradas, identificadas y colocadas en su lugar correspondiente junto a todas las demás.

Imaginemos una gran región de materia interestelar en algún lugar de nuestra Galaxia. Por definición, la materia *inter*estelar es la que existe entre las estrellas. La mayoría cree que allí no existe nada porque es muy cierto que en una noche clara sólo se ve negrura entre los diminutos puntos de luz que conocemos como estrellas. Pero la oscuridad del espacio exterior no hace más que corroborar los límites de nuestra visión. No existe mu-

cha materia en esa región, desde luego, pero no cabe duda de que la hay. El espacio interestelar es tan vasto, que incluso pequeñas cantidades de materia diseminadas aquí y allá se acumulan para representar un papel importante. Un número suficiente de cantidades minúsculas puede llegar a ser una cantidad ingente con el tiempo.

El medio interestelar es, pues, una región galáctica enrarecida en la que nacen todas las estrellas y en la que muchas explotan y mueren.

La materia del espacio interestelar suele ser una mezcla de gas y polvo. La mayor parte del gas está en forma de átomos, aunque hay algunos cúmulos de átomos — moléculas — diseminados por el espacio. Las partículas de polvo interestelar no son muy diferentes del fino polvo de tiza que se deposita en el borde de la pizarra o del polvo doméstico que se acumula bajo la cama o en los armarios; las diminutas partículas de la niebla terrestre podrían ser un ejemplo mejor.

Si el gas y el polvo del espacio interestelar hubieran permanecido para siempre dispersados uniformemente, no se hubieran podido formar estrellas ni planetas ni, desde luego, vida. El cielo sería completamente oscuro, y no existiría nadie para verlo. Por fortuna, el medio interestelar no es inmutable. Como todo lo demás, cambia su ordenación.

En teoría, la materia contenida en las oscuras regiones del espacio sufre fluctuaciones y de este modo se fragmenta en grandes masas que suelen abarcar decenios o incluso centenares de años luz. Debido a la oscuridad reinante en ellas, ha sido siempre difícil, si no imposible, observar estas regiones. Francamente, no hay nada que ver en una zona oscura, lo cual explica, dicho sea de paso, por qué los científicos han desconocido desde el nacimiento de la astronomía, y hasta fecha muy reciente, todo lo relativo a la génesis de las estrellas.

Las regiones oscuras y polvorientas del espacio interestelar son inaccesibles para los aparatos ópticos de los astrónomos. Incluso las estrellas existentes detrás de estas regiones son invisibles porque el polvo absorbe su radiación, impidiéndole llegar a la Tierra y dispersándola como se dispersa en la niebla la luz de los faros de un automóvil. Sin embargo, esto no significa que esos tenebrosos espacios interestelares sean totalmente impenetrables. Las maravillas de la tecnología moderna permiten tomar muestras de las ondas de radio y la radiación infrarroja emitida por estas regiones invisibles. Estos tipos de radiación tienen mayores longitudes de onda que la luz ordinaria, lo cual les permite atravesar los escombros del espacio interestelar. Con las mismas técnicas empleadas por los soldados para localizar al enemigo por la noche mediante sensores infrarrojos, y por los mismos medios que permiten funcionar a los receptores de radio entre la niebla más espesa, los aparatos de radio y de rayos infrarrojos de los investigadores pueden detectar la radiación invisible procedente de la oscuridad del espacio interestelar.

El análisis de la radiación emitida por materia interestelar confirma nuestra predicción teórica de que gran parte del espacio que rodea a las estrellas de cualquier galaxia está ocupado por grandes nubes gaseosas. Su morfología general tiende a parecerse a las esponjosas nubes irregulares de la atmósfera de la Tierra, pero la semejanza termina aquí. Las nubes interestelares son miles de millones de veces mayores que la Tierra, y se materializan y dispersan miles de millones de veces más lentamente que las nubes terrestres.

Observaciones de ondas de radio y rayos infrarrojos han establecido que las nubes interestelares son frías y tenues; a menudo no contienen más de cien átomos por centímetro cúbico. Esta densidad es extremadamente baja, mucho más baja, en realidad, que la de los mejores vacíos obtenibles en cualquier laboratorio de física; como punto de comparación, diremos que la densidad normal del aire en la Tierra es de más de un millón de billones de átomos por centímetro cúbico. Su temperatura característica, unos − 250 grados centígrados, es también extremadamente baja, ya que la temperatura mínima posible (a la que cesa todo movimiento átomico) es − 273 grados centígrados.

Ahora imaginemos una pequeña parte de una nube o nebulosa interestelar, por ejemplo una parcela de gas y polvo mucho menor de un año luz de diámetro. Debido a la tenuidad de la nebulosa, esta parcela no alberga muchos átomos. A menos que la nube tenga la temperatura mínima físicamente posible, cada átomo se moverá al azar.

Mientras se mueven de un lado para otro, los átomos están bajo la influencia de la fuerza de atracción ejercida por los demás átomos vecinos. Esta fuerza no es muy grande, debido a la pequeña masa de cada átomo. De hecho, aunque algunos átomos se acercaran accidentalmente unos instantes, su fuerza de atracción conjunta no bastaría para mantenerlos de modo permanente en una condensación aislada. El cúmulo accidental se dispersaría tan de prisa como se hubiese formado.

Supongamos que ensanchamos nuestro campo visual para incluir más átomos, cincuenta, cien, o incluso un millar. ¿Ejercería un grupo de tantos átomos una fuerza gravitatoria conjunta lo bastante fuerte como para impedir que se dispersaran como en el ejemplo anterior? ¿Cuántos átomos se necesitan para que la gravedad los fusione hasta que formen una aglomeración muy compacta?

Las respuestas a estas preguntas no pueden encontrarse en el simple estudio de la gravedad. La solución correcta no depende sólo de ella sino también de otras condiciones físicas como el calor, la rotación, el magnetismo y la turbulencia. Estos agentes adicionales tienden a influir la evolución de una nebulosa interestelar, pues, aunque no deben considerarse como antigravedad, lo cierto es que compiten con la gravedad.

Análisis de la radiación emitida por las regiones galácticas prueban que las nebulosas interestelares tienen algún calor, aunque no mucho. La mayor parte de su calor proviene de las inevitables colisiones entre los átomos. Colisiones atómicas más frecuentes significan más fricción y, por lo tanto, más calor, del mismo modo que frotarnos las manos con rapidez genera más calor que hacerlo lentamente. El calor presta a una nebulosa de gas cierta fuerza que tiende a competir con la gravedad. De hecho, el calor es la principal razón de que el Sol no se colapse; la presión hacia fuera del gas calentado contrarresta la presión hacia dentro de la gravedad. La cantidad de calor contenido en las nebulosas interestelares es pequeña, naturalmente, según los patrones solares e incluso terrestres. Por consiguiente, los efectos termales, que compiten fuertemente con la gravedad una vez están formadas las estrellas, no juegan un gran papel hasta que las nebulosas interestelares empiezan a contraerse, generando así mayores cantidades de calor.

La rotación puede igualmente competir con la fuerza de la gravedad. Una nebulosa en contracción con una rotación incluso pequeña tiene tendencia a desarrollar un bulto en su parte central. Esta protuberancia es indicio seguro de que una parte de la materia intenta desafiar a la gravedad para dispersarse. A medida que la nebulosa se contrae y pierde tamaño en el proceso de convertirse en estrella, su rotación aumenta necesariamente, del mismo modo que un patinador artístico gira más rápidamente con los brazos pegados al cuerpo. Cualquier objeto en rotación rápida ejerce una fuerza hacia fuera; cuanto mayor es la rotación, tanto mayor es la fuerza. Cualquier persona puede sentir esta fuerza cuando va en la rueda giratoria de un parque de atracciones. En el caso de una nebulosa interestelar, los átomos cercanos a la periferia son particularmente vulnerables a la fuga si la fuerza de la gravedad resulta insuficiente para retenerlos. Si la rotación de una nebulosa de gas en contracción aumentara hasta un punto en que la gravedad ya no pudiera mantenerla intacta, se dispersaría, devolviendo los átomos al más tenue medio interestelar. El barro con que nos salpican las ruedas de una bicicleta en veloz rotación es un buen ejemplo. El único modo que una nube interestelar tiene a su alcance para contrarrestar

la amenaza de la dispersión por rotación es atraer más y más átomos, a fin de incrementar la fuerza colectiva de la gravedad. En resumen, las nubes interestelares en rotación rápida necesitan más masa que las exentas de rotación para garantizar la contracción continuada que las convertirá en estrellas.

El magnetismo, la turbulencia y otros efectos físicos pueden obstaculizar también la contracción de una nube de gas. Observaciones hechas durante la pasada década demuestran que las verdaderas nubes interestelares no son muy calientes, giran con lentitud y tienen poco magnetismo y turbulencia. Pero las teorías apuntan a que incluso cantidades minúsculas de cualquiera de estos agentes puede competir efectivamente con la gravedad. Una cantidad realmente ínfima de cada uno de ellos puede unirse para alterar considerablemente la evolución de la nube normal de gas interestelar.

Así, pues, formar una estrella no es un sencillo caso de gravedad atrayendo materia. Existen muchos factores adicionales que sirven para complicar el problema y dificultar la comprensión detallada del proceso.

Ahora volvamos a nuestra pregunta original: ¿Cuántos átomos (de hidrógeno y helio) han de acumularse para que la fuerza de gravedad conjunta impida que una bolsa de gas, una vez formada, se disperse en el circundante espacio interestelar? La respuesta, incluso para una nube fría sin rotación ni magnetismo, es un número muy elevado; de hecho, casi mil millones de billones de billones de billones de billones de átomos (o sea, 10^{57}) son necesarios para que la gravedad fusione una condensación gaseosa. La magnitud de esta cifra es ingente, sin duda, mucho mayor que el número de granos de arena de todos los océanos del mundo e incluso mayor que los mil billones de billones de billones de billones (o sea, 10^{51}) de partículas elementales integradas en todos los núcleos atómicos de toda la Tierra. Es grande en comparación con todo lo que conocemos porque no existe en la Tierra nada comparable a una estrella.

Esta cifra, 10^{57} átomos, equivale casi exactamente a la masa de nuestro Sol. No se trata de una coincidencia. Nuestro Sol es una estrella muy común, lo cual significa que la mayoría de estrellas se forman de fragmentos interestelares y contienen aproximadamente este número de átomos. En su conjunto, las estrellas pueden nacer de condensaciones ligeramente menores o mayores, porque la gama de estrellas conocidas varía desde una décima parte hasta cien veces la masa de nuestro Sol, una variación pequeña en términos astronómicos.

Con unas dimensiones que oscilan entre los diez y los cien años luz, normalmente las nubes interestelares contienen miles de veces más materia que las estrellas; las observaciones lo prueban. Si una nube tiene que ser el lugar de nacimiento de las estrellas, no puede continuar siendo un glóbulo homogéneo intacto. Las nubes interestelares deben descomponerse gradualmente en subcondensaciones de menos de un año luz de diámetro. En teoría la fragmentación ocurre de modo natural, porque las inestabilidades gravitacionales en diversas partes de una nube interestelar fuerzan el desarrollo de heterogeneidades en el gas. Así pues, es normal que una nube media se descomponga en decenas e incluso centenares de fragmentos o pedazos que imiten el comportamiento de la nube entera, incluso contrayéndose más deprisa que ella.

No existen pruebas de que haya estrellas nacidas en aislamiento, o sea, una sola estrella de una nube. Se cree que las nubes interestelares inician su largo camino evolutivo para formar numerosas estrellas, cada una de mayor tamaño que nuestro Sol, o cúmulos enteros de estrellas, cada una comparable a nuestro Sol. La mayoría de estrellas, quizá todas, nacen como miembros de cúmulos estelares. Las que ahora se ven solas y aisladas en el espacio, como nuestro Sol, se separaron probablemente de sus hermanas, aunque sólo después de que todas estuvieran formadas por completo.

Una vez que una porción de nube ha adoptado su propia identidad dentro de una nebulosa interestelar, pasa por una serie de estadios inevitables. Al principio se contrae bajo el efecto de la gravedad que actúa sobre el grupo cada vez más denso de átomos; es como si se encogiera bajo la presión de su propio peso. A medida que la protoestrella se hace más compacta, los átomos colisionan más a menudo y calientan la porción de gas.

Cuando un fragmento autocalentado se ha contraído hasta alcanzar una extensión de una décima parte de un año luz, su temperatura se ha elevado a casi cero grados centígrados. Todavía es más frío que nuestra temperatura ambiente doméstica de veinte grados centígrados, pero mucho más caliente que la nube interestelar original antes de fragmentarse. El tamaño del fragmento en este estadio ha disminuido también considerablemente, aunque todavía es cien veces mayor que nuestro Sistema Solar. Esta porción de gas tendrá que seguir cambiando, reorganizándose en un objeto menor, más denso y más caliente antes de que pueda llamarse con propiedad una estrella.

Nuestra descripción es más que un esquema teórico. Hoy día todo esto se ha comprobado con claridad, aunque no visualmente, mediante el empleo de instrumentos recién inventados. En los años setenta, las observaciones de ondas de radio y rayos

infrarrojos empezaron a facilitar pruebas directas de que las nubes interestelares se fragmentan en pequeños cúmulos de gas. También sabemos que las bolsas de materia algo más calientes y densas que hay en el interior de las enormes, tenues y frías nubes son la regla y no la excepción.

Cabría esperar que la fragmentación continuase indefinidamente, produciendo masas en cantidad cada vez menor, que no podrían formar estrellas. Por fortuna, el proceso se detiene antes de que sea demasiado tarde. La densidad creciente del gas impide que el proceso de fragmentación reduzca todas las partes de la nebulosa a subunidades cada vez menores. A medida que los fragmentos individuales comprimen su gas, se van haciendo más compactos, y finalmente pueden evitar la fuga de radiación. Con la abertura natural de la nube parcialmente bloqueada, la radiación se acumula y hace que la temperatura se eleve, la presión se incremente y la fragmentación se detenga.

Sobre la evolución ulterior de cada condensación de gas, los diversos modelos teóricos predicen casi la misma historia: El tamaño del fragmento disminuye, su densidad aumenta y su temperatura se eleva, tanto en el centro como en la periferia. Varios miles de años después de que empiece a contraerse, las dimensiones de un fragmento medio son comparables a las de nuestro entero Sistema Solar, un tamaño que todavía es diez mil veces mayor que el de nuestro Sol. Las temperaturas interiores habrán alcanzado en este estadio muchos millares de grados centígrados, temperaturas mayores que las reinantes en los hornos de acero más calientes fabricados por nuestra civilización aquí en la Tierra.

Algunos centenares de miles de años más tarde, toda la extensión de un fragmento cabría dentro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, y su temperatura ha aumentado constantemente hasta alcanzar los cien mil grados centígrados o poco menos. Esto es, desde luego, mucho calor. Las partículas elementales, arrancadas ahora a átomos desintegrados, giran impetuosas en el interior. Pese a este verdadero infierno, estas partículas son aún demasiado lentas para vencer su natural repulsión electromagnética y entrar en el reino de la fuerza nuclear. En otras palabras, la materia está aún lejos de los diez millones de grados centígrados necesarios para iniciar la combustión nuclear que un día transformará esta masa gaseosa en una verdadera estrella. No obstante, el objeto caliente y denso se parece ya lo bastante a una estrella para merecer el nombre especial de protoestrella. Este objeto en embrión se halla en el amanecer del nacimiento estelar.

Modelos teóricos aparte, ¿ha proporcionado la observación alguna prueba de que estos fragmentos calientes y densos tengan dimensiones de Sistema Solar? Desde luego que sí. En la última década, los radiotelescopios captaron radiaciones emitidas por pequeñas masas situadas cerca o en el centro de muchos fragmentos de nebulosa. El diámetro de las masas sobrepasa apenas la milésima parte de un año luz, o equivale aproximadamente al tamaño de nuestro Sistema Solar. Sus densidades totales de gas alcanzan casi los mil millones de partículas por centímetro cúbico, y sus temperaturas, medidas por medio de técnicas infrarrojas, se elevan a muchos centenares de grados centígrados. La mayoría de astrofísicos está de acuerdo en que estas masas densas y calientes son auténticas protoestrellas a punto de alcanzar el rango estelar.

Los objetos protoestelares emiten radiación, que en su mayor parte procede de pequeñas moléculas formadas cuando se fusionan algunos átomos. La radiación es especialmente intrigante por su elevada intensidad. Las primeras observaciones obtenidas en la década de los sesenta de la radiación de ondas de radio de una masa semejante resultaron tan enigmáticas que los investigadores, perplejos, empezaron a llamar a la emisora molecular «mysterium». Más adelante fue identificada debidamente como el radical hidroxilo (un átomo de hidrógeno más otro de oxígeno), y hoy día estas poderosísimas señales son intensificadas o amplificadas mediante un proceso muy especial de «máser».

La palabra *láser* se ha convertido en un término común. En realidad se compone de las siguientes siglas: «*l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation».* Los lásers son ingenios experimentales que emiten un rayo concentrado de radiación luminosa en un haz muy estrecho. Nuestra civilización no ha adquirido hasta hace un par de decenios la capacidad de fabricar semejantes instrumentos, basados en una tecnología avanzada y en profundos conocimientos de física atómica y molecular. Los lásers actúan excitando los átomos y moléculas de un gas para estimularlos a emitir radiación simultáneamente. De este modo se puede obtener una tremenda descarga de radiación, mucho más potente que la de las bombillas corrientes.

Los másers son similares a los lásers, sólo que en vez de radiación óptica emiten radiación de microondas (radio de baja frecuencia). Podemos construirlos en nuestros laboratorios terrestres, aunque son aparatos muy delicados que requieren condiciones especiales y mucha paciencia. Utilizados debidamente, son los mejores amplificadores que se conocen, mucho más efectivos que los transistores corrientes.

* Amplificación de la luz por una emisión estimulada de radiación.

Es interesante que ciertas regiones del espacio interestelar sean particularmente aptas para producir radiación amplificada de microondas. Al parecer, las masas protoestelares gozan de estas condiciones especiales requeridas, que son, en primer lugar, excitar algunas moléculas y, en segundo lugar, estimularlas para que emitan con intensidad. Las cálidas temperaturas y moderadas densidades de las masas son ideales para este único mecanismo de emisión. Por consiguiente, la intensa radiación máser observada en ciertas moléculas puede analizarse para conocer mejor las regiones protoestelares. Estos estudios comprenden una de las zonas más interesantes de la astrofísica contemporánea.

En teoría las protoestrellas son todavía un poco inestables. La fuerza de la gravedad hacia dentro no contrarresta eficazmente la presión del gas hacia fuera. Por fortuna, la temperatura es aún demasiado baja para establecer ese equilibrio «gravedad dentro, presión fuera» que garantiza la estabilidad, y decimos «por fortuna» porque si el gas calentado pudiera contrarrestar la gravedad antes de alcanzar el punto de combustión nuclear, no existirían las estrellas. El cielo nocturno abundaría en opacas protoestrellas, pero carecería totalmente de estrellas verdaderas. Y es probable que ni nosotros ni otras formas de vida inteligente pudiéramos existir para apreciarlas.

Los modelos de computadora predicen que mientras las protoestrellas continúan contrayéndose, el gas no tiene otra salida que seguir los dictados de la gravedad. El resultado es calor renovado. Pero ni siquiera a una temperatura nuclear de un millón de grados centígrados hay el suficiente calor para iniciar la combustión nuclear. Las reacciones nucleares no comienzan hasta que la temperatura del centro llega a los diez millones de grados centígrados. Entonces los núcleos atómicos tienen la suficiente energía termal como para vencer su propia repulsión mediante el mismo proceso violento descrito más arriba para la transformación del hidrógeno en helio durante la época de las partículas. Por fin se ha formado una estrella. Su principal función será en lo sucesivo consumir hidrógeno, produciendo con ello helio y en especial energía.

Así pues, los corazones de las estrellas son los lugares donde los núcleos átomicos colisionan violentamente, emitiendo al hacerlo copiosas cantidades de energía. Nuestro Sol emite cada segundo más energía de la generada por los seres humanos durante toda su historia. La energía del infierno nuclear asciende por el interior de la estrella y es emitida desde la superficie en forma de luz y otros tipos de radiación estelar. Los puntos luminosos

que vemos en el cielo nocturno deben su existencia a los fuegos nucleares que arden en el interior de cada uno de ellos. Reflexionemos sobre esta actividad astronómica mientras contemplamos la bóveda celeste en una noche clara y tranquila.

La notable transformación de nube interestelar en fragmenton en contracción y en masa protoestelar y en estrella naciente dura unos diez millones de años. Esto es mucho tiempo según los patrones humanos, pero es todavía menos de la décima parte de un uno por ciento de la vida completa de una estrella. Todo el proceso equivale a una constante metamorfosis, a una especie de evolución, a la transformación gradual de una tenue y fría bolsa de gas en una estrella caliente, densa y redonda. El principal instigador de todo este cambio evolutivo es la gravedad.

En cuanto el calor y la gravedad se han equilibrado, una estrella como nuestro Sol es estable. Producirá constantemente energía durante unos diez mil millones de años. Una combinación de teoría y observación sugiere que el Sol lo ha hecho ya durante cinco mil millones aproximadamente, por lo que puede llamarse una estrella de mediana edad, un cuerpo celeste que seguirá brillando durante cinco mil millones de años más.

Las estrellas menores que nuestro Sol tardan más en formarse de materia interestelar, pero también duran más. Por ejemplo, las estrellas cuya masa es una décima parte de la del Sol, necesitan centenares de millones de años para nacer, y se supone que pueden durar un billón de años. Como este tiempo es mucho mayor que la edad del Universo, todas las estrellas pequeñas deben estar todavía quemando alegremente hidrógeno y produciendo helio y un constante chorro de energía para todos los planetas circundantes.

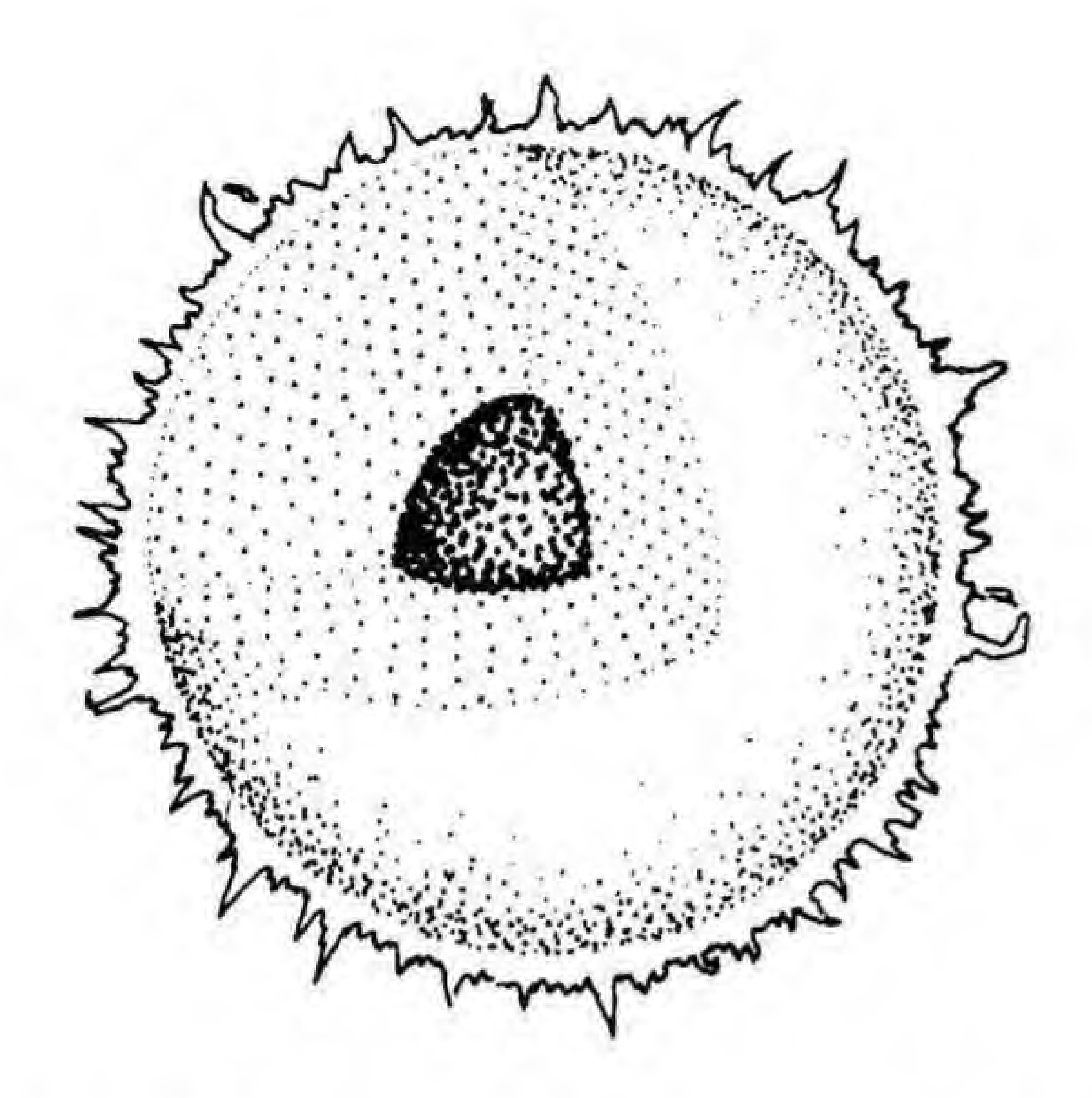
Las estrellas mayores que nuestro Sol tienden a formarse con más rapidez de las nebulosas interestelares, algunas en un tiempo tan breve como un millón de años. En contraste con las estrellas pequeñas, parecen hacerlo todo a un ritmo acelerado. Queman más rápidamente su combustible de hidrógeno; su masa comprime por gravitación a las estrellas grandes más que a las otras, obligando así a la materia que las compone a colisionar más frecuente y violentamente, lo cual acelera a su vez las reacciones nucleares. A pesar de su magnitud, las estrellas de mayor tamaño viven mucho menos de los diez mil millones de años de nuestro Sol. Las más grandes, por ejemplo, tienen una masa cien veces mayor que la del Sol, pero sólo duran unos diez millones de años. Gastan toda su estabilidad en una actividad fugaz, en un mero parpadeo a la escala normal de la vida cósmica. Por desgracia, el ritmo acelerado no siempre es deseable. Del mismo modo que no es sano para los seres humanos vivir una existencia agitada, las estrellas de mayor tamaño tienen apenas tiempo de hacer una pausa. Al final, mientras las estrellas pequeñas se contraen y se van extinguiendo, las que son mayores que nuestro Sol perecen en medio de una explosión catastrófica. Por lo visto hay dichos que tienen una aplicación universal: A mayor tamaño, más dura es la caída.

Nada notable acontece a las estrellas en el transcurso normal de sus vidas. Mientras la combustión nuclear siga en equilibrio con la implacable fuerza de la gravedad, nada espectacular puede ocurrirle a una estrella. Su centro transforma con normalidad el hidrógeno en helio, en su superficie aparecen fulgores y manchas, y su atmósfera emite ingentes cantidades de radiación capaces de influir la historia de cualquiera de los planetas que giran a su alrededor. Pero, en general, las estrellas no experimentan cambios repentinos mientras están en equilibrio. Se limitan a fundir el hidrógeno en helio durante esta fase, la más larga en la historia de cualquier estrella, ya que dura el noventa y nueve por ciento de su existencia.

En equilibrio, las estrellas continuarían produciendo energía indefinidamente, de no ocurrir algún cambio drástico. Pero el caso es que este algo drástico acaba ocurriendo en todas las estrellas: el combustible empieza a escasear.

Aquí el modelo de computadora vuelve a ser nuestra mejor guía de los cambios específicos experimentados por cualquier estrella que se halle cerca de su extinción. Identificando numerosos factores físicos y químicos y ajustando una y otra vez sus magnitudes, los teóricos han construido modelos de la gran variedad de estrellas observadas en el Universo real. Primero detallaremos la decadencia de una estrella como nuestro Sol, tras lo cual podremos ampliar los límites para incluir a todas las estrellas, pequeñas y grandes. Pero debemos tener en cuenta que todos estos fatales acontecimientos ocurren en el último uno por ciento de la vida estelar.

En teoría, a medida que el Sol envejece su hidrógeno va agotándose gradualmente, por lo menos en un pequeño núcleo central de tamaño aproximado a la centésima parte del volumen total de la estrella. Al cabo de casi diez mil millones de años de combustión lenta y constante, poco hidrógeno queda dentro de la zona de diez millones de grados centígrados. Es probable que sea un poco como el automóvil que circula por una autopista a la velocidad constante de setenta kilómetros por hora durante



muchas horas sin el menor problema, hasta que el motor empieza a toser porque el depósito de gasolina se está quedando vacío. Pero a diferencia de los automóviles, las estrellas no repostan con facilidad.

La carencia de hidrógeno en el centro estelar causa la interrupción de la combustión nuclear. La combustión del hidrógeno continúa sin cambios en las capas intermedias, más arriba del centro pero todavía muy por debajo de la superficie. Sin embargo, el centro es lo que normalmente sustenta a la estrella, estableciendo su fundación y garantizando su equilibrio, por lo que la falta de combustión en el centro asegura la inestabilidad, ya que, aunque la presión del gas hacia fuera se debilite en el centro cada vez más frío, podemos tener la seguridad de que la fuerza de la gravedad no ha remitido. La gravedad no remite jamás. Una vez relajada la resistencia a la gravedad —aunque sea muy poco—, los cambios en la estrella se hacen inevitables.

La generación de más calor podría devolver el equilibrio a la estrella envejecida. Si, por ejemplo, el helio del centro pudiera empezar a fundirse en un elemento más pesado como el carbono, todo se solucionaría, ya que volvería a crearse la energía necesaria para restablecer la presión del gas hacia fuera. Pero el helio del centro no puede arder; por lo menos, todavía no. Pese a la fenomenal temperatura de diez millones de grados centígrados o más, el centro está demasiado frío para que el helio se funda en un elemento pesado.

Recordemos que se requiere una temperatura de por lo menos diez millones de grados centígrados para iniciar el más sencillo ciclo de fusión hidrógeno-helio. Es indispensable esta temperatura para que dos núcleos de hidrógeno en colisión tengan suficiente presión para vencer la fuerza repulsiva electromagnética que hay entre dos cargas iguales. De lo contrario, los núcleos no pueden penetrar en la zona de la fuerza nuclear, y el proceso de fusión no se inicia. Pues bien, con el helio, ni siquiera diez millones de grados centígrados son suficientes para la fusión. Cada núcleo de helio tiene una carga positiva neta dos veces mayor que la del núcleo de hidrógeno, lo cual hace que la fuerza repulsiva electromagnética sea mucho mayor. Para asegurar la fusión efectiva mediante una violenta colisión entre dos núcleos de helio, se requieren temperaturas extremadamente elevadas. ¿De qué orden? Pues de unos cien millones de grados centígrados.

Sin este grado de calor, el núcleo de cenizas de helio de la estrella no permanece inactivo mucho tiempo. Una vez casi agotado su combustible de hidrógeno, el núcleo de helio empieza a contraerse. Tiene que hacerlo; no hay la suficiente presión como para contrarrestar la gravedad. Este encogimiento permite el incremento de la densidad del gas, lo cual engendra más calor a medida que las colisiones de las partículas del gas se hacen más frecuentes.

El centro, cada vez más caliente, continúa calentando las capas intermedias de este horno estelar. El aumento de calor —en esta fase ya sobrepasa los diez millones de grados centígrados— provoca la fusión aún más rápida de los núcleos de hidrógeno de las capas intermedias.

La estrella envejecida se encuentra ahora realmente en una situación difícil. Su corazón está en desequilibrio y encogiéndose, dispuesto a generar el calor suficiente para la fusión del helio. Las capas intermedias y exteriores se hallan asimismo en desequilibrio, fundiendo hidrógeno en helio a un ritmo más rápido del normal. La presión de gas ejercida por esta incrementada combustión de hidrógeno va en aumento, forzando a las capas intermedias y en especial a las exteriores a expandirse. Ni siquiera la gravedad es capaz de detenerlas. ¡Mientras el núcleo se encoge, las capas exteriores se expanden! Ciertamente, el equilibrio anterior se ha roto por completo.

Los dos aspectos observables de esta estrella en apuros son muy interesantes. Para un astrónomo situado a gran distancia, la estrella tendría un aspecto gigantesco, de tamaño casi cien veces mayor del normal. La radiación captada sugeriría además que la superficie de la estrella era algo más fría de lo normal.

(Esto no quiere decir que se pueda observar directamente la dilatación o el enfriamiento de una estrella envejecida. Teóricamente, la transición de una estrella normal a una anciana gigante dura mucho más tiempo —alrededor de cien millones de años— que una vida humana.)

El segundo cambio, el enfriamiento de la superficie, es resultado directo del primero: el aumento de tamaño. A medida que el tamaño de la estrella aumenta, la suma total de su calor abarca un volumen estelar considerablemente mayor. De ahí que la radiación visible emitida por una superficie que se enfría, pero que es aún muy caliente, sufra variaciones en el color. Del mismo modo que el metal pasa del blanco al rojo al enfriarse, la estrella entera muestra un tinte rojizo. Con el paso del tiempo, prolongado según los patrones humanos pero breve según los estelares, una estrella de tamaño normal y color amarillo se transforma paulatinamente en otra de tamaño gigantesco y color rojo. La rutilante estrella normal ha evolucionado hasta convertirse en un opaco gigante rojo.

Así, cuando el Sol haya agotado el hidrógeno de su núcleo, la inestabilidad se producirá sin remedio. El núcleo se encogerá. Las capas exteriores se expandirán. En resumen, el Sol está condenado a convertirse en una esfera hinchada hasta cien veces su tamaño normal, de hecho, lo bastante grande como para engullir a muchos de los planetas, incluyendo a Mercurio y Venus, y quizá también a la Tierra y a Marte.

No hay necesidad de que los seres humanos se dejen dominar por el pánico; al menos, todavía no. Si la teoría de la evolución estelar que hemos descrito aquí es razonablemente acertada podemos estar seguros de que nuestro Sol no alcanzará la fase de gigante roja hasta dentro de cinco mil millones de años.

Las estrellas gigantes y rojas no son producto de la imaginación de algún teórico, sino que existen realmente, diseminadas aquí y allá por el firmamento. Incluso a simple vista se puede observar a la gigante roja más famosa de todas: una estrella llamada Betelgeuse, anciano y dilatado miembro de la constelación de Orión.

En el caso de que el desequilibrio inherente a una gigante roja se mantuviera durante un tiempo excesivo, el centro acabaría implosionando, mientras el resto de la estrella se expansionaría con lentitud. Diversas fuerzas y presiones operando en el interior de la decrépita estrella la desmembrarían literalmente. Por suerte para la veterana del espacio, este torturante encogimiento-expansión no dura para siempre. Cien millones de años después de que la estrella haya empezado a padecer falta de hidrógeno, ocurre otra cosa: el helio comienza a arder. Aunque esto parezca un verdadero renacimiento, sólo se trata de una corta tregua.

En el centro de una gigante roja, la densidad aumenta a medida que se desarrolla la presión interior. Cuando la materia del núcleo de la estrella ha llegado a ser mil veces más densa que en el centro de una estrella normal, las colisiones entre las partículas de gas serán lo bastante frecuentes y violentas como para generar, por la fricción, el calor suficiente para alcanzar los cien millones de grados requeridos para la fusión del helio. Los núcleos del helio colisionarán, transformándose repentinamente en núcleos de carbono y reiniciando una vez más la combustión central. Después, durante un período de unas pocas horas, el helio arde ferozmente, como una bomba incontrolada.

Pese a su brevedad, esta reacción nuclear emite un enorme caudal de nueva energía. Esta energía es lo bastante potente como para volatilizar algo de materia del centro, disminuyendo con ello la densidad y aliviando un poco la tensión acumulada entre los núcleos cargados. Este pequeño ajuste expansivo del centro detiene el colapso gravitacional de la estrella, devolviéndole el equilibrio; una vez más el equilibrio entre la fuerza de la gravedad y la presión del gas.

Ya iniciadas las reacciones de la fusión del helio en carbono, que han estabilizado el centro, las reacciones de la fusión del hidrógeno en helio, desatadas en las capas externas, remiten un poco. Quizá nos gustaría pensar que la estrella ha expandido con excesiva rapidez sus capas externas, sobrepasando la distancia a la que consigue un cómodo equilibrio entre la gravedad y el calor. Entonces es cuando puede encogerse un poco y perder su apariencia hinchada. Como todos los otros cambios evolutivos de las primeras o últimas fases de una estrella, este leve ajuste de tamaño se hace rápidamente... en unos cien mil años.

Aunque las escalas de tiempo para los marcados cambios estelares se consideran rápidas en todas las fases de evolución estelar a partir del polvo, así como de su curso hacia la extinción, debemos subrayar que siguen siendo dilatadas en comparación con la duración de una vida humana. Los observadores tienen pocas esperanzas de presenciar las fases evolutivas de una estrella individual, y se ven obligados a depender de computaciones teóricas para obtener una buena aproximación de los diversos estadios que caracterizan el nacimiento y la muerte de una estrella.

Esta dependencia de los modelos de computadora es exactamente lo que desconcierta al comprobar los resultados de un experimento importante. El único experimento que se refiere directamente a los procesos físicos del interior de las estrellas no concuerda del todo con las predicciones para una estrella como nuestro Sol. Los científicos han sido incapaces de detectar el número esperado de partículas elementales llamadas neutrinos en la radiación solar que llega a la Tierra. Derivados de una palabra italiana que significa «pequeño neutral», los neutrinos carecen, según experimentos realizados en la Tierra, prácticamente de masa y de carga, y viajan a la velocidad de la luz. Sin casi ninguna interacción, ¡los neutrinos consiguen pasar libremente y sin obstáculos a través de un espesor de varios millones de años luz de plomo! De ahí que puedan escapar sin esfuerzo del núcleo solar, donde se crean como un subproducto de las reacciones nucleares. La radiación corriente salta de un lado a otro en el interior solar durante millones de años antes de ser emitida al espacio, pero se predice que los neutrinos llegan a la Tierra a los ocho minutos de ser creados, de manera que constituyen la única prueba directa de los mecanismos nucleares considerados como la fuerza motriz del Sol.

Los neutrinos penetran tranquilamente en la Tierra a todas horas; aunque no nos perjudican ni somos conscientes de su contacto, por lo visto salpican nuestros cuerpos de una forma constante. Sin embargo, uno de los raros materiales con que los neutrinos sí establecen una interacción es una sustancia química de nombre parecido a un trabalenguas, tetracloroetileno. A pesar de esta complejidad patronímica, se trata de un líquido inofensivo comúnmente usado en la industria de la tintorería. Para contar el flujo de neutrinos solares que llegan a la Tierra, se ha construido un «telescopio de neutrinos» en el fondo de una mina de oro, llenando un gran tanque con centenares de litros de esta sustancia. Se necesita profundidad para garantizar la ausencia de otras partículas elementales no solares. Aunque el aparato experimental parece funcionar como es debido, el número de neutrinos detectados es considerablemente menor de lo que predice la teoría.

Los astrofísicos luchan actualmente con los resultados en un intento de resolver lo que se antoja una seria amenaza a la exactitud de nuestro conocimiento de la fusión estelar. No obstante, tanto teóricos como experimentadores son reacios a atribuir cualquier error conceptual en la teoría de la evolución estelar a la escasa abundancia de neutrinos solares. Algunos sospechan del aparato experimental, otros, de los modelos de computadora, mientras otros alegan que aún no sabemos lo suficiente sobre los neutrinos. Pero todos los investigadores coinciden —o al

menos así lo esperan— en que la interpretación apropiada del experimento de los neutrinos no refutará nuestro concepto de la fusión solar.

Existen limitaciones en todos los aspectos de la evolución cósmica. Sobre la época estelar, como sobre las otras épocas, los investigadores conocen las líneas generales de muchas cosas, pero los pormenores siguen escapando a nuestra comprensión.

Las reacciones nucleares continúan produciéndose en el centro de la estrella —constituido por helio—, pero no por mucho tiempo. El helio que aún puede existir allí se consume rápidamente. El ciclo de fusión helio-carbono, como el ciclo hidrógeno-helio que lo ha precedido, sigue su curso en proporción directa con la temperatura; cuanto mayor es la temperatura del centro, tanto más rápida es la reacción. A estas elevadísimas temperaturas, el helio del centro estelar no puede durar mucho; sólo unos pocos millones de años.

La formación de cenizas de carbono en el centro del núcleo causa fenómenos físicos similares a los ocurridos con anterioridad en el centro de helio. Primero se agota el helio del mismo centro; entonces la fusión cesa allí, tras lo cual el núcleo de carbono se encoge y calienta un poco, provocando la aceleración de los ciclos de combustión del hidrógeno y el helio en las capas intermedias y externas de la estrella. Estas capas acaban expansionándose, de modo parecido a como lo hicieron antes, convirtiendo nuevamente a la estrella en una gigante roja.

A condición de que la temperatura del centro sea lo bastante elevada para la fusión de dos núcleos de carbono, o incluso una mezcla de núcleos de carbono y helio, pueden sintetizarse productos todavía más pesados. Una energía recién generada vuelve a sustentar a la estrella, restituyéndole su acostumbrado equilibrio entre la gravedad y el calor.

Este ciclo de contracción, calentamiento, fusión y enfriamiento es en general la forma de creación de muchos elementos pesados dentro de los últimos estertores de los núcleos estelares. Todos los elementos más pesados que el helio son creados durante el último uno por ciento de la vida de una estrella.

¿Cómo mueren las estrellas? De nuevo hemos de depender en parte de los modelos de computadora y en parte de lo observable en el firmamento. Para decirlo con franqueza, el problema estriba en que nadie ha visto morir a una estrella desde la in-

vención del telescopio hace casi cuatro siglos. Guiados por las predicciones teóricas del comportamiento estelar cerca de la extinción, los astrónomos escudriñan el Universo, buscando pruebas de objetos que se parezcan a las formas predichas.

Todos los modelos teóricos indican que las fases finales de la evolución estelar dependen críticamente de la masa de la estrella. En general podemos decir que las estrellas de masa reducida mueren con suavidad, mientras que las de masa abundante lo hacen de modo catastrófico. Nuestro Sol y todas las estrellas menores son miembros de la categoría de masa reducida, mientras que las de tamaño mucho mayor que nuestro Sol se agrupan en la categoría de masa abundante.

La extinción de nuestro Sol está destinada a ser bastante sencilla y poco espectacular. El centro se volverá extraordinariamente compacto y caliente. Un solo centímetro cúbico de núcleo estelar pesará al final una tonelada, lo que equivale a mil kilos de materia comprimidos en un volumen del tamaño de un dedal. No obstante, incluso a densidades tan elevadas, las colisiones entre núcleos no son lo bastante frecuentes y violentas para elevar la temperatura hasta los fenomenalmente elevados seiscientos millones de grados requeridos para fundir el carbono en cualquiera de los elementos pesados. No hay bastante materia en las capas externas de las estrellas menores para que ello ocurra. Por consiguiente, en las estrellas de masa reducida no se sintetiza el oxígeno, hierro, oro, uranio y muchos otros elementos.

Las estrellas pequeñas como nuestro Sol acaban encontrándose en una situación crítica al envejecer. Su núcleo de carbono está prácticamente muerto. El helio existente justo encima del núcleo de cenizas de carbono continúa transformándose en más carbono, mientras el hidrógeno de las capas intermedias se convierte en más helio. Esta embestida de calor aparta lentamente las capas externas a distancias todavía mayores. El resultado teórico es un objeto de apariencia espectral llamado nebulosa planetaria, que tiene dos partes bien definidas: un halo de materia tenue y caliente que oculta por completo un centro caliente y denso.

El adjetivo «planetario» es desorientador, porque estos objetos astronómicos no están relacionados en modo alguno con planetas. La designación data del siglo XVIII, cuando los instrumentos ópticos de los astrónomos apenas podían distinguir entre las miríadas de borrosas y pálidas manchas de luz del cielo nocturno. Algunos investigadores las tomaron por planetas. Pero observaciones subsiguientes demostraron con claridad que el aspecto borroso de la nebulosa se lo prestaba una concha de gas caliente que rodeaba a una pequeña estrella central. Los telescopios modernos resuelven totalmente estas nebulosas planetarias, permitiendo a los astrónomos reconocer su verdadera naturaleza.

Espectrales o no, se han descubierto casi mil ejemplos de nebulosas planetarias sólo en nuestra Galaxia. Las observaciones directas confirman las predicciones teóricas de que la cubierta consiste en una envoltura de gases que están siendo expulsados con suavidad lejos del núcleo de una gigante roja.

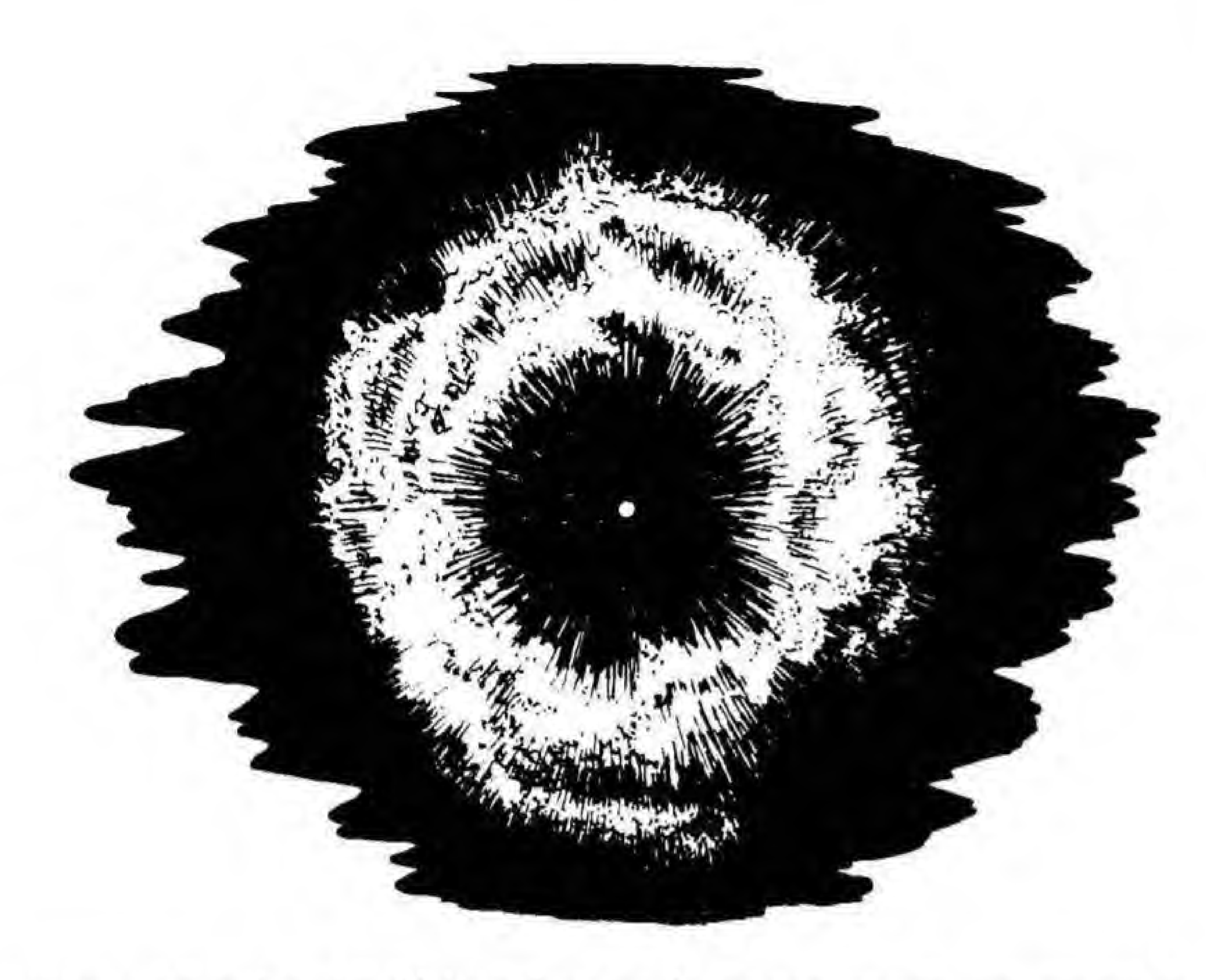
Seguir con la evolución de esta envoltura no sería muy interesante. Se limita a continuar expandiéndose con el tiempo, haciéndose más fría y difusa y fundiéndose eventual e imperceptiblemente con el medio interestelar. Así pues, éste es un modo de que el medio interestelar se enriquezca con átomos adicionales de helio y posiblemente con algunos más de carbono.

La evolución posterior del núcleo o resto estelar del centro de una nebulosa planetaria no es tampoco muy emocionante. Anteriormente oculto por la atmósfera de la gigante roja, el núcleo hace su aparición cuando la tenue envoltura se ha evaporado. Son unos cuerpos pequeños y calientes, muy ricos en carbono, pero que ya carecen de combustión nuclear. Su brillo se debe a la energía acumulada, aunque su reducido tamaño garantiza el color blanco. No son mucho mayores que el planeta Tierra, y se llaman enanas blancas.

El análisis de la radiación emitida por las estrellas enanas demuestra que sus propiedades concuerdan bastante bien con las predicciones del modelo de computadora. Muchas se encuentran en el mismo centro de las nebulosas planetarias y se han descubierto varios centenares desnudas en nuestra Galaxia, después de que sus envolturas fueran barridas hace mucho tiempo y desaparecieran en el espacio.

Así pues, los astrónomos pueden identificar a las estrellas gigantes rojas, a las nebulosas planetarias y a las estrellas enanas del cosmos cercano. En diferentes fases de su vejez, cada uno de estos objetos parece concordar con la disposición general predicha por los cálculos teóricos para las estrellas viejas de masa reducida. Pero una vez más tenemos que renunciar a ver el acto de expulsión de la envoltura durante el curso de una vida humana. Han de pasar varias decenas de miles de años para que la atmósfera de una gigante roja se expanda lo suficiente para que aparezca una estrella enana blanca.

Nada emocionante acontece después de esto a las estrellas enanas, de las que puede decirse que están prácticamente muertas. Siguen enfriándose y difuminándose con el tiempo, transformándose lentamente de enanas blancas en amarillas y final-



mente en rojas. La última fase es la enana negra, un rescoldo frío, denso y consumido en el espacio. Estos cuerpos estelares han llegado al cementerio de las estrellas.

Nadie sabe cuántas enanas negras existen realmente en la Galaxia, lo cual no es sorprendente, puesto que ninguna está iluminada. Y aunque pudieran detectarse, probablemente no encontraríamos muchas. La duración total de la vida de una estrella de masa reducida es tan larga como la de la Galaxia o más. Nuestra Vía Láctea no ha existido el tiempo suficiente para que muchas estrellas de masa reducida hayan completado todo el ciclo, desde el nacimiento hasta la muerte. Quizá aún no lo ha hecho ninguna.

Un destino diferente espera a los cuerpos que tienen un tamaño varias veces mayor que el de nuestro Sol. En general, su evolución es muy parecida a la de sus hermanas de masa reducida hasta llegar a la fase de gigantes rojas, con una sola diferencia. Todos los cambios evolutivos ocurren con mayor rapidez en las estrellas de gran masa porque la abundancia de ésta les permite generar más calor. Y, más que ninguna otra cosa, el calor acelera todos los sucesos evolutivos.

En la fase de gigante roja, el núcleo de una estrella de gran masa es capaz de alcanzar los seiscientos millones de grados centígrados requeridos para fundir el carbono en elementos aún más pesados. Aquí la clave es la abundancia de masa. Las estrellas de gran masa generan una mayor fuerza gravitacional que las estrellas de tipo solar, y la gravedad incrementada puede comprimir la materia del centro hasta darle una densidad suficiente para asegurar colisiones frecuentes y violentas entre las partículas de gas.

Los modelos teóricos estipulan que una estrella altamente evolucionada de gran masa posee varias capas donde se queman los diversos núcleos. El interior de la estrella se parece a una cebolla. En la periferia relativamente fría que se halla justo debajo de la superficie, el hidrógeno se funde en helio. En las capas intermedias, el helio y el carbono se funden en núcleos más pesados. Justo encima del centro está el magnesio, el silicio, el azufre y otros numerosos núcleos pesados. El centro rebosa de núcleos de hierro, trozos de materia bastante complejos que contienen varias docenas de protones y neutrones y están situados a medio camino entre los más ligeros y los más pesados de todos los núcleos conocidos. Cada uno de los ciclos de fusión, durante los cuales se crean los núcleos de nuevos elementos, es inducido por períodos de inestabilidad estelar. El centro se enfría, se contrae, se calienta un poco más, se funde en núcleos pesados, agota el combustible, vuelve a enfriarse, vuelve a contraerse, etcétera. En cada fase de combustión estelar se emite energía como un subproducto del proceso de fusión, energía que sostiene a la estrella contra la gravedad.

Con hierro en su centro, surgen complicaciones para esta estrella enferma y moribunda. Las interacciones nucleares en que interviene el hierro no producen energía; los núcleos de hierro son tan compactos que la energía no puede extraerse. Hasta cierto punto, desempeñan el papel de extintores de incendios, humedeciendo repentinamente el infierno estelar, al menos en el centro. Con la aparición de cantidades sustanciales de hierro, el fuego se extingue por última vez.

Ahora existe claramente una situación de peligro. No sólo esta estrella masiva ha dejado de ser sostenida por la combustión nuclear de su centro, sino que se encuentra de repente sin base; el equilibrio ha desaparecido por completo. Aunque la temperatura del núcleo de hierro ha alcanzado ya varios millones de grados centígrados, la enorme fuerza de atracción sobre la materia asegura la catástrofe en el futuro inmediato de la estrella. A menos que la combustión nuclear se mantenga, la estrella está en un peligro seguro.

Cuando la gravedad vence a la presión del gas caliente, la es-

trella implosiona, desplomándose sobre sí misma. La implosión no dura mucho, quizá sólo una horas tras la extinción del fuego nuclear en el centro. Las temperaturas y densidades internas se elevan entonces fenomenalmente, haciendo que la estrella rebote al instante, detonando partes de su centro y desechando todas las capas circundantes. Gran parte de su masa —incluyendo una serie de elementos pesados cocidos en su interior— sale despedida hacia las regiones vecinas del espacio. Esta expulsión es muchísimo más violenta que la ocurrida en una nebulosa planetaria; esta estrella ha explotado catastróficamente. Todas las estrellas de tamaño mucho mayor que nuestro Sol están condenadas a perecer de este modo. Este último y espectacular estertor es conocido como una supernova.

Los astrónomos reconocen ahora que las supernovas no son realmente estrellas nuevas. Su repentina luminosidad, que de invisibles las transforma brevemente en brillantes, fue lo que dio esta impresión a los astrónomos de la Antigüedad.

La explosión de una supernova es uno de los sucesos más tumultuosos acontecidos en cualquier galaxia. Los escombros estelares son calientes y pueden emitir un destello mil millones de veces más brillante que la radiación de nuestro Sol. Dicho de otro modo, una sola estrella supera en mil millones de veces la luminosidad del Sol a las pocas horas de su explosión. Al cabo, como en cualquier explosión, la onda expansiva remite, pero no antes de que la vecindad galáctica haya recibido la radiación de una potente energía y muchos elementos pesados.

Los astrofísicos no están seguros de los detalles en el momento exacto de la explosión de una supernova porque ninguna estrella cercana ha explotado de este modo desde que Galileo Galilei usó por primera vez una lente a guisa de telescopio en el siglo XVII. Tampoco los modelos teóricos explican con claridad los pormenores de la explosión.

Estos modelos sugieren que, mientras los elementos pesados como carbono, nitrógeno, oxígeno, sodio, magnesio, silicio y hierro son producidos en los interiores estelares, la explosión en sí crea elementos más pesados que el hierro. En el momento de la explosión y durante los quince minutos subsiguientes, algunos núcleos de peso intermedio son apretados violentamente unos contra otros, creándose así los núcleos más pesados de todos. Muchos de los elementos raros son sintetizados en estos momento, incluyendo al níquel, plata, oro, uranio y plutonio. La materia más apreciada por las sociedades terrestres se originó en los últimos estertores de estrellas que habían sido grandes y brillantes y ahora están muertas y desintegradas. Irónicamente, los elementos más pesados sólo se crean después de la extinción de las grandes estrellas.

Los diseminados escombros de antiguas estrellas se mezclan entonces con hidrógeno y helio interestelares, producidos ambos durante la primera época del Universo. Esta mezcla de elementos inicia otro ciclo de contracción, calentamiento y combustión nuclear, fabricando así la segunda, tercera y enésima generación de estrellas en una sucesión aparentemente interminable de muerte y renacimiento; una especie de reencarnación cósmica. Nuestro propio Sol es por lo menos una estrella de la segunda generación, porque ya contiene elementos pesados. Como estos elementos no pudieron crearse en una estrella de masa reducida y relativamente fresca como el Sol, deben ser producto de antiguas estrellas masivas que explotaron hace muchísimo tiempo.

¿Cómo sabemos que las estrellas cuecen elementos pesados de esta manera? ¿Cómo podemos estar seguros de que esta teoría de nucleosíntesis estelar es correcta? Nos lo asegura una prueba circunstancial y otra directa. En primer lugar, la tasa de captación de diversos núcleos y la tasa de su decadencia son conocidas gracias a estudios de laboratorio realizados durante los años sesenta y setenta. Cuando todas estas tasas son incorporadas a un programa de computadora que también tiene en cuenta las temperaturas, densidades y composiciones en muchas posiciones de una estrella normal, las cantidades relativas de cada tipo de núcleo sintetizado concuerdan con bastante exactitud con las abundancias relativas de los aproximadamente noventa elementos encontrados en la naturaleza, y en especial con las abundancias de elementos de peso intermedio, incluyendo al hierro. Así, pese al hecho de que nadie ha observado nunca directamente a los núcleos atómicos en el acto de producción, podemos estar razonablemente seguros de que la teoría de nucleosíntesis estelar tiene sentido según nuestros conocimientos actuales de física nuclear y evolución estelar.

En segundo lugar, la observación de un tipo de núcleo —uno muy pesado llamado tecnecio— facilita la prueba directa de que la formación de elementos pesados ocurre realmente en los centros de las estrellas. Se sabe por mediciones de laboratorio que este núcleo tiene una vida radiactiva media de unos doscientos mil años. Se trata de un tiempo muy breve a escala astronómica, y de ahí la razón de que nadie haya encontrado ni siquiera trazas de tecnecio natural en la Tierra; desapareció hace mucho tiempo. (Sin embargo, puede fabricarse y estudiarse en los laboratorios nucleares). Por otra parte, el hecho de haber detectado la existencia de tecnecio en numerosas gigantes rojas indica que debió sintetizarse en los últimos centenares de miles de años.

Las supernovas no son sólo vanas predicciones de los teóricos. Hay muchas pruebas de que hubo explosiones cósmicas en nuestra Galaxia. Uno de los restos de supernova más estudiados es la Nebulosa del Cangrejo, llamada así porque su aspecto recuerda a dicho animal marino. A unos cinco mil años luz de la Tierra, sus restos están diseminados por una extensión de más de diez años luz. Por estar muy debilitada ya, la Nebulosa del Cangrejo sólo puede verse por medio de un gran telescopio. Pero la medición del desplazamiento de la materia expulsada —que recorre unos mil kilómetros por segundo— indica que tuvo lugar una brillante explosión cuya radiación debió llegar aquí hace unos novecientos años. De hecho, la explosión del año 1054 fue tan espectacular que los manuscritos de la antigua Asia y del Oriente Medio comparan su brillo con el de la Luna. La Nebulosa del Cangrejo pudo verse en pleno día durante casi un mes.

Otras numerosas estrellas de gran masa estallaron sin duda en tiempos pasados. Documentos antiguos dan fe de la aparición de por lo menos media docena de supernovas en nuestra Galaxia durante los últimos mil años. El cielo nocturno alberga pruebas adicionales de muchos restos estelares que deben tener su origen en la remota prehistoria. Además, los astrónomos que patrullan los cielos con sus telescopios advierten de vez en cuando un repentino fulgor en alguna parte de una galaxia lejana, lo cual no sólo corrobora que las estrellas de gran masa son comunes a todas las galaxias, sino que nos permite perfeccionar las predicciones de los modelos teóricos. Casi cien supernovas han sido observadas en otras galaxias durante el siglo XX. Su brillo, que emula a escala mucho mayor las características básicas de las explosiones de bombas termonucleares fabricadas por el hombre, rivaliza a veces momentáneamente con el de toda la galaxia donde hacen explosión.

La última supernova observada en nuestra Galaxia causó una sensación mundial en tiempos del Renacimiento. La repentina aparición y desvanecimiento subsiguiente de un brillante cuerpo estelar en el año 1604 ayudó a invalidar la filosofía aristotélica del Universo inmutable. Nadie podía comprender entonces que esta explosión estelar inspiraría la mentalidad favorable al nacimiento de la idea de evolución cósmica, que conlleva el concepto de cambio.

La escasa frecuencia de las supernovas es un poco inquietante. Conociendo el ritmo de sus pasos evolutivos y estimando el número de estrellas de gran masa existentes en la Galaxia, sería de esperar que alrededor de cada cien años estallase una supernova en un lugar observable (lejos de las partes más polvorientas de la Vía Láctea). No es probable que explosiones tan brillantes hayan pasado desapercibidas desde que se produjo la última hace varios siglos. De ahí que se tenga la impresión de que en la Vía Láctea debería haber explotado hace tiempo una supernova. A menos que las estrellas de gran masa estallen con mucha menor frecuencia de la sugerida por la teoría de la evolución estelar, cualquier día de estos podríamos tener el privilegio de presenciar el acontecimiento más espectacular de la naturaleza.

Las supernovas pueden ser algo más que espléndidos juegos de luz. Si detonara una estrella de gran masa en los suburbios galácticos donde reside nuestro Sol, podría muy bien inundar toda la Tierra de radiación nociva para la vida. De hecho, las capas externas de las estrellas de gran masa se desprenden con fuerza y salen despedidas hacia el espacio en forma de partículas elementales extremadamente veloces que llamamos rayos cósmicos. Así pues, intentar comprender las propiedades físicas de las estrellas cercanas es algo más que un interés pasajero. La facultad de predecir el modo en que morirán las estrellas cercanas es francamente necesaria. Preocupa especialmente la posibilidad de que alguna de nuestras estrellas vecinas explotase como una supernova, aunque es probable que no pudiéramos hacer nada para evitarlo.

El inventario de estrellas situadas en nuestra vecindad galáctica indica que puede esperarse la explosión de una supernova dentro de los treinta años luz de nuestro Sol cada quinientos millones de años. ¿Demasiado a menudo para nuestra tranquilidad? Por fortuna, ninguna de las estrellas más próximas es lo bastante grande para que sufra una muerte catastrófica. Tenemos la suerte de que todas estén destinadas a perecer, como nuestro Sol, por la vía más plácida de la gigante roja-enana blanca.

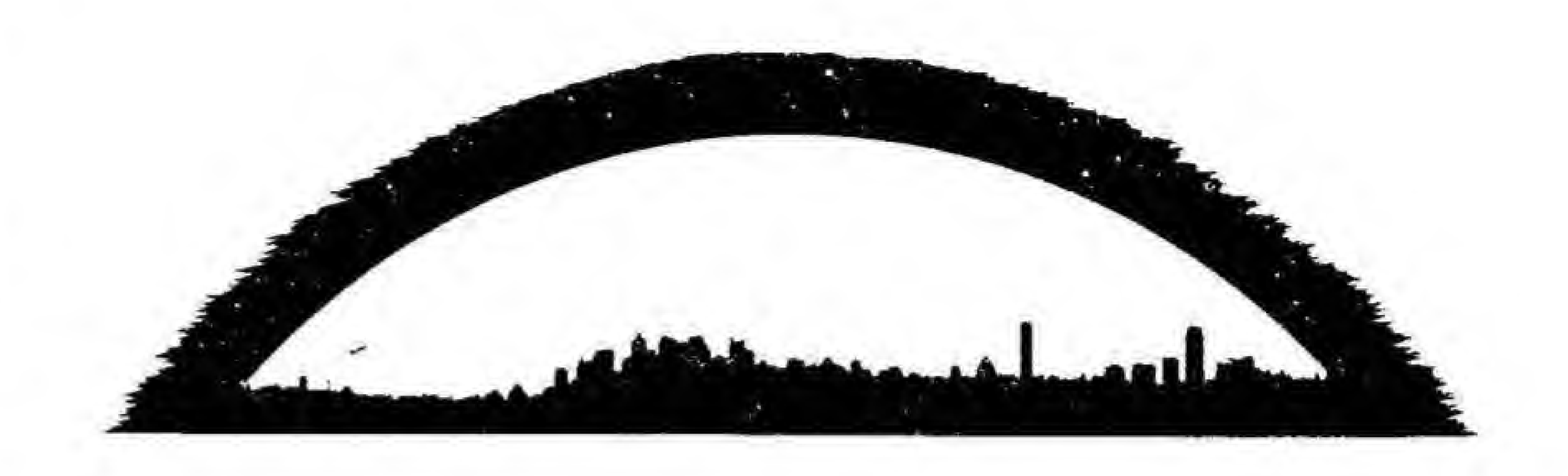
Es casi seguro que una estrella observable de gran masa ha estallado ya, pero la luz de tan magnífico espectáculo aún ha de llegar a nuestro planeta. En caso de que una supernova apareciera súbitamente en el cielo, podemos tener la seguridad de que los principales instrumentos astronómicos del mundo estarían enfocados hacia este maravilloso espectáculo de luz. De hecho, muchos observatorios han establecido «equipos de alerta de supernovas». El Harvard-Smithsonian Observatory, por ejemplo, dispone de varios astrofísicos preparados para tomar el mando, en el plazo de una hora, de todos los telescopios con base en tierra y todos los vehículos espaciales operados por este centro colectivo. (Una falsa alarma en un reciente Día del Trabajador incluso ayudó a resolver algunas dificultades de comunicación, ¡por si una supernova cometiera la inconsideración de llegar a la Tierra en un día de fiesta humano!) El principal objetivo

será el estudio de las primeras fases de la explosión de una supernova, en especial de los diversos tipos de radiación emitida, desde las relativamente inofensivas ondas de radio hasta los potencialmente letales rayos gamma.

¿Qué queda tras la explosión de una supernova? ¿Sale toda la estrella despedida en pedazos que se esparcen por el medio estelar circundante? En realidad, no es así. La mayoría de modelos teóricos predicen la supervivencia de alguna parte de la estrella. Como ocurre con las nebulosas planetarias, que expelen la materia menos violentamente, las supernovas dejan también un núcleo de restos. El material que integra este núcleo tan comprimido representa uno de los estados más extraños de todo el Universo.

Durante el momento de la implosión de una estrella de gran masa, justo antes de la explosión, todos los electrones del centro chocan furiosamente con los protones. Los electrones han estado siempre ahí, pero los protones son liberados cuando algunos núcleos pesados se desintegran bajo la fenomenal embestida. El resultado es una reacción de partículas elementales que recorre todo el centro de la estrella masiva, convirtiendo sistemáticamente en cuestión de segundos todos los electrones y protones en neutrones y neutrinos. Los neutrinos abandonan rápidamente la escena a la velocidad de la luz; muchos teóricos les atribuyen un papel importante en la explosión de las supernovas, porque los neutrinos tienen que transportar gran parte de la energía del centro colapsado a las capas externas de la estrella, depositarla allí y hacer que el resto de la estrella explote en el espacio. Mucho más pesados que los neutrinos, los restos de materia se alejan a velocidades mucho menores que la de la luz. Sólo el centro permanece intacto, convertido en una bola de neutrones. Los investigadores la llaman familiarmente estrella neutrónica, pero no se trata de una «estrella» en el verdadero sentido de la palabra.

Según la teoría de la evolución estelar, las estrellas neutrónicas, aunque tengan todavía una gran masa, son muy pequeñas. Están compuestas pura y simplemente de partículas elementales de neutrones apiñadas en una esfera compacta. Y su radio no es mucho mayor que el de una ciudad media. Ya que cada trozo de núcleo que no haya hecho explosión suele tener varias veces la masa de nuestro Sol, las estrellas de neutrones son extraordinariamente compactas. Se estima que su densidad media es por lo menos un billón de veces mayor que la de las rocas terrestres. Esta densidad no es solamente enorme, sino increíble; casi un millón de veces mayor que la de las ya supercompactas enanas



blancas. De hecho, la densidad de un núcleo atómico normal no es mucho mayor; las estrellas de neutrones están tan comprimidas como la materia de los núcleos de átomos normales. Esta densidad extraordinaria ya ha aparecido en la historia de la evolución cósmica en el mismo principio de la época de las partículas del Universo. El estudio detallado de las misteriosas estrellas neutrónicas podría por consiguiente facilitar a los científicos una comprensión mejor de las condiciones físicas reinantes inmediatamente después del comienzo del Universo.

Una vez las estrellas han explotado como supernovas, todas las reacciones nucleares cesan. Los cálculos teóricos indican que las estrellas neutrónicas son objetos sólidos, más parecidos a planetas que a estrellas. A condición de que se hubiesen enfriado lo suficiente, podríamos imaginar sin esfuerzo que nos manteníamos de pie sobre su superficie. No sería fácil; la gravedad de una estrella neutrónica es increíblemente intensa. Una persona de setenta kilos de peso en la Tierra pesaría en la superficie de una estrella de neutrones el equivalente terrestre de unos mil millones de kilos. En realidad, ni siquiera le sería posible mantenerse en pie, porque la gravedad la reduciría al espesor de un sello de correos. Tan grande es la gravedad en una estrella neutrónica que si la población mundial pudiera alcanzar su superficie ¡se vería reducida al volumen de un guisante!

¿Podemos estar seguros de que existen realmente objetos tan extraños como las estrellas neutrónicas? La respuesta vuelve a ser afirmativa. Durante la última década, observadores de ondas de radio y rayos X han realizado varios descubrimientos notables que prueban la existencia de tales estrellas. Estos investigadores han estudiado varios centenares de estrellas pulsantes, o pulsars, que emiten pulsaciones cortas de una duración aproximada de una centésima de segundo cada una. Cada pulsación emite una descarga de radiación, tras la cual no hay nada. En-

tonces llega otra pulsación. Los intervalos entre las pulsaciones son asombrosamente uniformes, tanto, que las emisiones repetidas podrían usarse como reloj.

Muchos pulsars parecen estar directamente asociados con restos de supernovas. El pulsar estudiado más intensivamente se halla cerca del centro de la Nebulosa del Cangrejo. Determinando la velocidad y trayectoria de la materia expelida por dicha supernova, los investigadores han podido trabajar hacia atrás y localizar el punto del espacio en que ocurrió la explosión y donde se supone que está localizado el núcleo de la supernova. Y es precisamente la región de la Nebulosa del Cangrejo de donde surgen las señales pulsantes. Al parecer, los pulsars son los restos de antiguas estrellas de gran masa.

Lo astrofísicos arguyen que el único mecanismo físico que concuerda con pulsaciones de semejante precisión sería una radiofuente pequeña en rotación. Sólo la rotación puede causar el alto grado de regularidad observado en las pulsaciones, y sólo un objeto pequeño puede causar pulsaciones tan precisas; la radiación emitida por un objeto mayor de unos diez kilómetros de diámetro llegaría a la Tierra en momentos ligeramente distintos que interrumpirían la precisión de las pulsaciones. Así pues, no es sorprendente que el mejor modelo teórico de un pulsar considere una estrella neutrónica pequeña y compacta, que esté en rotación y envíe a la Tierra periódicos destellos de radiación. El «pulsar» del experimentador y la «estrella neutrónica» del teórico son sinónimos.

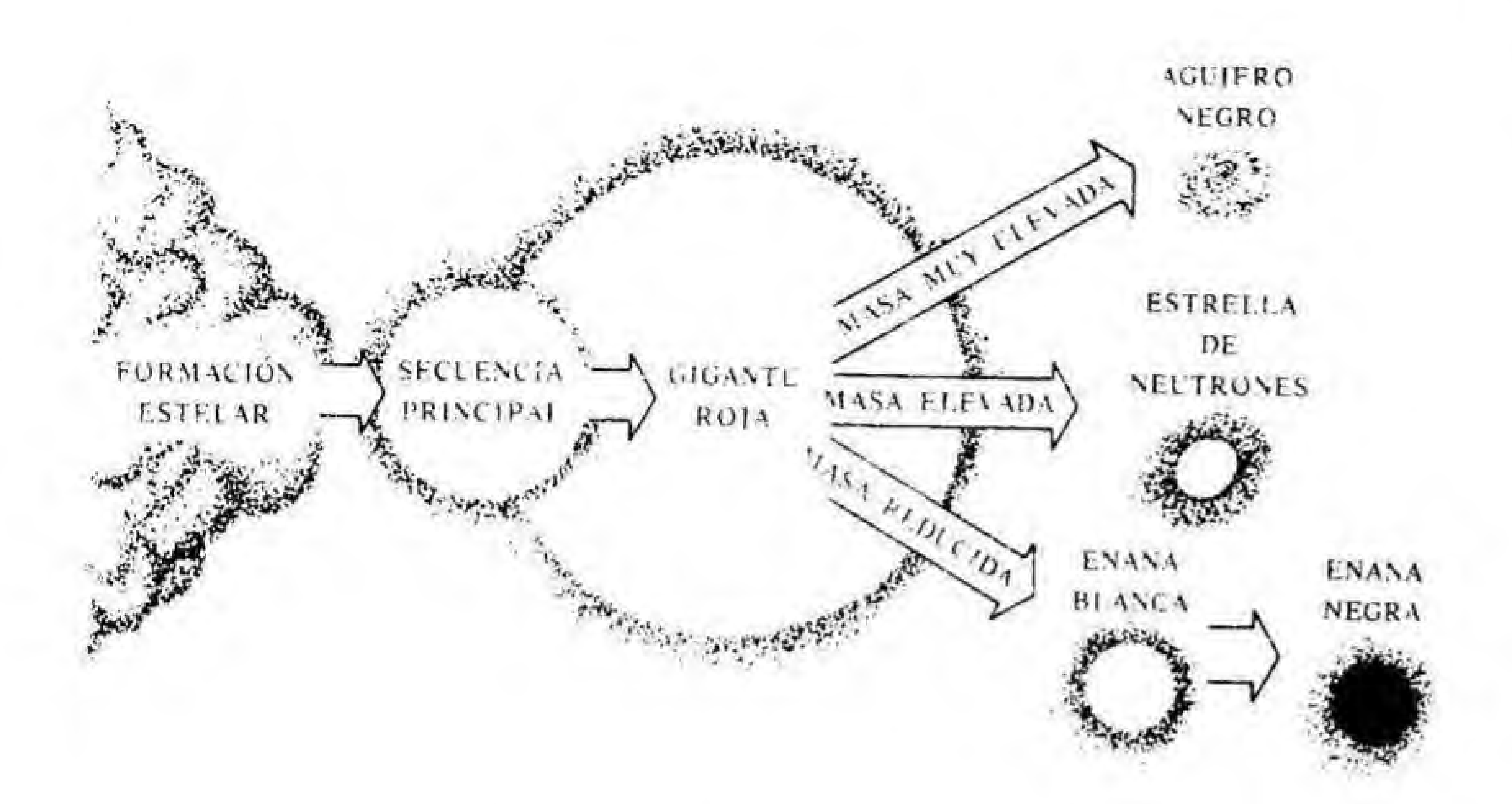
Según un modelo teórico generalmente aceptado, en la superficie de una estrella neutrónica, o en su atmósfera, hay un «punto caliente» que emite una radiación continua en una especie de estrecho haz de faro. Este «punto» podría ser una superficie violenta o tormenta atmosférica muy similar a los menos energéticos fulgores de nuestro Sol o a los volcanes terrestres. Aunque el punto emite una continua radiación hacia el espacio, la rotación de la estrella, que da muchas vueltas por segundo, garantiza que la radiación emitida en cualquier dirección se comporte como una lluvia de discretas explosiones. La radiación barre el espacio como la luz de un faro giratorio. Su llegada a la Tierra, tal vez miles de años más tarde, es observada como una serie de pulsaciones rápidas. La duración de cada pulsación contiene información sobre la fuente de actividad de la estrella neutrónica, mientras el período de las pulsaciones revela la rotación de la estrella. Los detalles del modelo teórico son incompletos y polémicos, porque los investigadores no tienen apenas información sobre el comportamiento de la materia cuya densidad alcanza el millón de toneladas por centímetro cúbico.

Las estrellas neutrónicas son desde luego objetos insólitos.

Sin embargo, teóricamente se mantienen más o menos en equilibrio, igual que la mayoría de otras estrellas. No obstante, en el caso de las estrellas neutrónicas el equilibrio no significa una estabilidad entre la fuerza gravitacional hacia dentro y la presión de gas caliente hacia fuera. Las estrellas neutrónicas no tienen gas caliente. La presión hacia fuera es ejercida por la naturaleza cristalina de los apiñados neutrones. En su apretada coexistencia, los neutrones forman una bola de materia que ni siquiera la gravedad podría comprimir más... con una notable excepción.

Se ha sugerido que todas las galaxias albergan restos de núcleo estelar en masas tan grandes, que la fuerza gravitacional puede de hecho comprimir aún más la compacta esfera de neutrones puros. Según algunas teorías, si la materia suficiente se comprime en un volumen extremadamente pequeño, la fuerza gravitacional colectiva podría aplastar gradualmente a cualquier fenómeno compensatorio. En este caso, la gravedad se considera tan potente que puede comprimir una estrella de gran masa en un cuerpo del tamaño de un planeta, de una ciudad, de una cabeza de alfiler, de un microbio, o de algo aún más pequeño. La fuerza gravitatoria existente en la vecindad de estos objetos se considera tan grande, que la propia luz volvería hacia ellos como las pelotas de béisbol vuelven a la tierra después de ser lanzadas al aire. Semejantes objetos monstruosos no emitirían luz, ni radiación, ni ninguna clase de información. Incomunicada, semejante estrella de gran masa se habría colapsado efectivamente en un agujero, un agujero quizá no mayor de unos pocos centímetros, pero en el que caería toda la materia cercana, atrapada por la gravedad tal vez para siempre. Los astrofísicos llaman a estos grotescos terminales de la evolución estelar agujeros negros.

Un agujero negro es una región que contiene una ingente cantidad de masa repartida en un volumen extremadamente pequeño. Más que un objeto, se trata de un agujero, que por añadidura es oscuro. El campo gravitacional del agujero tiene una fuerza fantásticamente grande, lo bastante grande como para curvar de forma pronunciada el espacio y el tiempo que se hallen en su vecindad. El agujero negro tiene una gravedad tan enorme en parte a causa de su enorme masa. Pero esto es sólo la mitad de la ley de la gravedad. La otra mitad dicta que la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Y puesto que el término de la distancia es cuadrado, el campo de fuerza



gravitacional puede crecer de modo espectacular si la distancia entre dos partes cualesquiera de un objeto disminuye, es decir, comprimiendo más el objeto.

Cuando la masa superviviente de un núcleo de supernova excede la de varios soles, ninguna fuerza conocida puede contrarrestar a la gravedad. Ni siquiera los neutrones, tocándose unos a otros, pueden detener la fuerza de la gravedad en un objeto tan compacto. La teoría sugiere que la antigua estrella se colapsa indefinidamente, reduciendo la materia a las dimensiones de un punto. Implosiona catastróficamente sin límites; al parecer, nada puede detenerla.

¿Es acaso posible apreciar un fenómeno aparentemente tan ridículo? ¿Cómo puede una estrella encogerse hasta quedar reducida al tamaño de una partícula elemental, y continuar su camino hacia dimensiones todavía más pequeñas? ¿Tiene esto algún sentido? Pues es el resultado que prevén fórmulas matemáticas muy detalladas. Sin ningún agente que compita contra la gravedad, los masivos restos del núcleo son instantáneamente reducidos a puntos singulares de tamaño infinitamente pequeño.

Aunque no es posible exponer aquí las matemáticas extraordinariamente complejas necesarias para comprender la verdadera naturaleza de los agujeros negros, podemos comentar algunos aspectos cualitativos de estas densísimas y excéntricas regiones del espacio.

Consideremos ante todo el concepto de velocidad de escape. Para cualquier trozo pequeño de materia —molécula, pelota de béisbol, cohete, lo que sea—, la velocidad requerida para escapar de un objeto mayor es proporcional a la raíz cuadrada de la masa del objeto mayor dividida por su radio. Por ejemplo, en la Tierra, con un radio de unos seis mil kilómetros, la velocidad de escape equivale a unos diez kilómetros por segundo. Para alejar algo de la superficie de nuestro planeta, se necesita una velocidad todavía mayor.

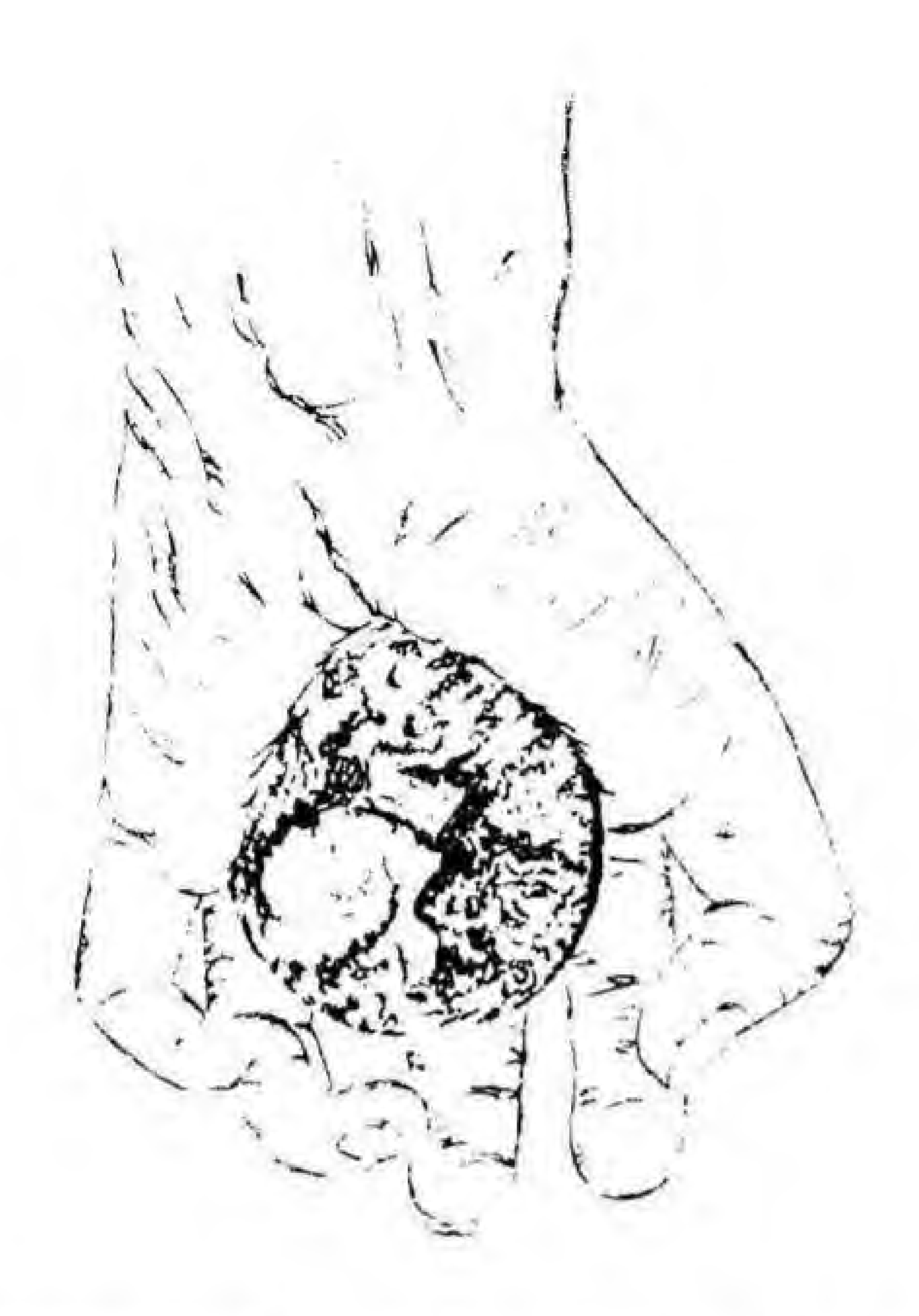
Imaginemos ahora un experimento hipotético cuyo principal aparato sea una gran prensa de tornillo tridimensional. Supongamos que esta prensa es lo bastante grande como para abarcar toda la Tierra. Por terrible que parezca, imaginemos a la Tierra comprimida por todos lados. A medida que nuestro planeta se encoge bajo la presión, su densidad aumenta porque la cantidad total de masa permanece constante dentro de un volumen en continua compresión.

Supongamos que nuestro planeta queda reducido a una cuarta parte de su tamaño actual, debiendo doblar así la velocidad de escape. Cualquier cosa que intentara escapar de esta Tierra hipotéticamente comprimida requeriría una velocidad de unos veinte kilómetros por segundo. Comprimamos la Tierra un poco más, por un factor adicional de mil, por ejemplo, haciendo que su radio tenga poco más de un kilómetro. Escapar de un objeto de un kilómetro de radio, pero con una masa equivalente a toda la Tierra, requiere una velocidad de muchos centenares de kilómetros por segundo.

Si imaginamos todavía más comprimido a nuestro planeta natal, veremos que la velocidad de escape de esta Tierra ridículamente compacta se eleva de modo proporcional. De hecho, si nuestra prensa hipotética comprimiera la Tierra hasta dejarla reducida a un centímetro cuadrado, la velocidad requerida para escapar de su superficie equivaldría a 300.000 kilómetros por segundo, lo cual no es una velocidad corriente, sino la de la luz, la mayor velocidad permitida por las leyes de la física tal como las conocemos hoy día.

De manera que, si por algún medio fantástico, todo el planeta Tierra pudiera ser reducido al tamaño de una tableta de aspirina, la velocidad requerida para escapar de ella excedería la velocidad de la luz. Y como esto es imposible, la única conclusión es que nada —absolutamente, nada— podría escapar de la superficie de semejante «Tierra». No habría ningún modo de lanzar un cohete o emitir un rayo de luz o cualquier tipo de radiación. Además, no podría haber ningún intercambio informativo con semejante cuerpo astronómico. Se habría vuelto invisible e incomunicativo. ¡Casi puede afirmarse que un objeto supercompacto como este habría desaparecido del Universo!

Este ejemplo es hipotético, naturalmente. No es probable que exista una prensa de tornillo capaz de reducir a la Tierra a di-



mensiones centimétricas. Pero en las estrellas de gran masa existe una prensa similar: la fuerza de la gravedad.

La gravedad no puede aplastar a la Tierra de esta manera porque no hay suficiente masa; la fuerza gravitacional colectiva de todas las partes de la Tierra sobre todas las demás partes no es lo bastante potente. Sin embargo, al final de una vida estelar, cuando la combustión nuclear ha cesado, la gravedad puede aplastar literalmente a la estrella por todos los lados, comprimiendo así una enorme cantidad de materia en una esfera muy pequeña.

Cuando la masa de las estrellas equivale a la de varios soles, el tamaño crítico en el que la velocidad de escape equivale a la de la luz no es, como para la Tierra, de dimensiones de centímetros. Para los núcleos estelares típicamente grandes, este tamaño crítico es del orden de kilómetros. Por ejemplo, un resto de núcleo con una masa equivalente a diez veces la del sol tiene un tamaño crítico de varias decenas de kilómetros. Ciertamente, esta compresión no es menos espectacular que comprimir a un tamaño de centímetros un objeto grande como un planeta. Pero en el caso estelar no estamos hablando de una situación hipotética en la que se emplea una prensa imaginaria. La implacable fuerza de la gravedad es lo bastante fuerte como para reducir estrellas enteras a dimensiones extraordinariamente pequeñas.

El potente campo gravitacional de las estrellas de gran masa no es hipotético en absoluto; es real.

El tamaño crítico bajo el cual se predice la desaparición de los objetos astronómicos ha recibido un nombre especial. Llamado «horizonte de sucesos», este radio define la región en cuyo interior nadie podrá ver ni oír ni conocer ningún suceso. Por consiguiente, se dice que los horizontes de sucesos de la Tierra y de una estrella cuya masa sea la de diez veces nuestro Sol tienen respectivamente un centímetro y treinta kilómetros.

Ahora podríamos sugerir que los magos serían capaces de hacer desaparecer monedas y otros objetos pequeños si los apretaran lo bastante entre sus manos. Incluso las personas podrían desaparecer si fuera posible comprimirlas hasta un tamaño menor de 10^{-23} centímetros. Desde luego, la gravedad no nos hará esto. Por suerte para nosotros, individualmente no disponemos de bastante masa. La fuerza gravitatoria colectiva de todos los átomos de nuestros cuerpos es mucho menor que la fuerza requerida para comprimirnos hasta tamaño tan minúsculo. Tampoco existe ningún medio tecnológico conocido que sea capaz de esta proeza.

Lo importante aquí es lo siguiente: De no haber una fuerza capaz de contrarrestar la propia gravedad de una estrella muerta, cuya masa equivalga a la de varios soles, semejante objeto se colapsaría naturalmente, y por propio acuerdo, hasta un radio siempre en disminución. La teoría sugiere que el encogimiento de un resto de núcleo estelar de gran masa no se detendrá ni siquiera al llegar a un radio igual al horizonte de sucesos, que no es una barrera física de ningún tipo, sino sólo una barrera de comunicación. El resto nuclear sigue encogiéndose hasta alcanzar valores cada vez más pequeños, probablemente en el proceso de convertirse en un punto infinitesimal, o una singularidad. Decimos «probablemente» porque no podemos estar seguros de que no exista una fuerza no descubierta todavía que sea capaz de detener el colapso en algún momento situado entre el horizonte de sucesos y el punto de singularidad. La disciplina requerida para descubrir semejante fuerza —la gravedad cuántica— aún tiene que inventarse.

Tal es, pues, la secuencia de sucesos esperados si estos últimos estadios de la evolución estelar son válidos. Una estrella de gran masa termina su ciclo de combustión explotando en una supernova. Gran parte del contenido original de la estrella es expelida como veloces escombros. Si queda atrás una masa que equivalga a varias veces la del Sol, el núcleo no explosionado se colapsará catastróficamente, sumergiéndose bajo el horizonte de sucesos en menos de un segundo. El núcleo se limita a parpadear y desaparece literalmente, dejando una región pequeña y oscura

de la que la radiación no puede escapar. Así nace un agujero negro, como una región ennegrecida del espacio. No son realmente objetos, sólo agujeros; agujeros negros en el espacio.

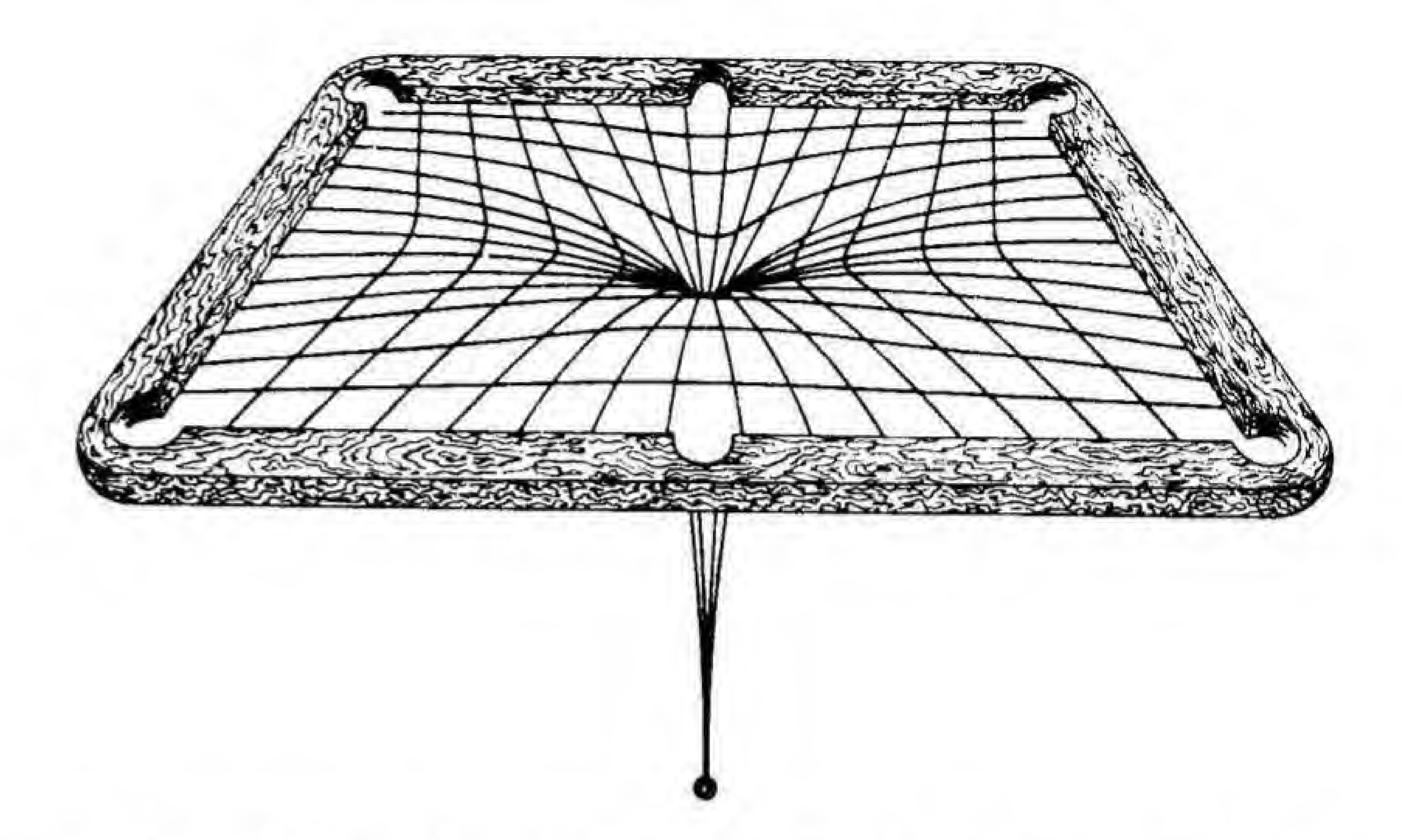
Los agujeros negros son estrictamente productos de la teoría de la relatividad. Mientras las enanas blancas y las estrellas de neutrones son terminales válidos de la evolución estelar incluso dentro de los confines de la teoría de la gravedad newtoniana, sólo la teoría del espacio-tiempo de Einstein predice la existencia de agujeros negros. Como tales, se espera que obedezcan todas las leyes clásicas de la teoría de la relatividad. En particular, se espera que la masa contenida en un agujero negro distorsione el espacio y el tiempo de su proximidad. El campo gravitacional se ensancha cerca del agujero, y la curvatura del espacio-tiempo se extrema. En el horizonte de sucesos, la curvatura es tan grande que el espacio-tiempo se dobla sobre sí mismo, provocando la desaparición de los objetos atrapados.

Hay varias maneras de imaginar la curvatura del espacio-tiempo cerca de un agujero negro, aunque cada una de ellas es solamente una analogía. El problema aquí, como antes en el caso de todo el Universo, es nuestra incapacidad de tratar conceptualmente con cuatro dimensiones.

La formación de agujeros negros y la curvatura extrema del espacio-tiempo provocada por ellos pueden apreciarse imaginando un nutrido grupo de personas que viven sobre una enorme sábana de goma, una especie de trampolín gigante. Cuando deciden celebrar una reunión, todas las personas excepto una convergen en un lugar determinado en un determinado momento. Su reunión será un suceso en el espacio-tiempo. La única persona que ha quedado atrás puede mantener el contacto por medio de pelotas que le llegan rodando por la sábana de goma. Estas pelotas son el análogo de la radiación que viaja a la velocidad de la luz, mientras la sábana de goma es el análogo de la estructura del propio espacio-tiempo.

Cuando las personas convergen, la sábana empieza a hundirse bajo su peso. La acumulación de masa en un espacio pequeño crea un elevado grado de curvatura del espacio-tiempo. Las pelotas aún pueden llegar hasta la persona que vive sola en un espacio-tiempo esencialmente plano, pero la alcanzan con menos frecuencia a medida que la sábana se va hundiendo progresivamente.

Por último, cuando ha llegado al lugar convenido un número suficiente de personas, la masa es demasiado grande para que la goma pueda sostenerla. La sábana se rompe, desapareciendo todas las personas por el agujero. Las pelotas mensajeras tampoco



pueden volver ya al superviviente solitario. Por grande que fuera la velocidad de la última pelota no le es posible salvar la depresión de la sábana.

De modo similar, en teoría un agujero negro de gran masa curva completamente el espacio-tiempo que lo rodea, aislándolo así del resto del Universo.

Los agujeros negros tienen dos características importantes que merecen ser mencionadas. La primera es que no son aspiradores cósmicos; no se pasean por el espacio interestelar succionando todo lo que ven. Se supone que la dinámica de los objetos próximos a los agujeros negros es la misma que la de cualquier objeto cercano a una estrella de gran masa. La única diferencia reside en que, en el caso de un agujero negro, los objetos orbitan alrededor de una región oscura e invisible. Ninguna radiación emitida o reflejada de ninguna clase procede de la posición del agujero negro.

Así pues, los agujeros negros no hacen ningún esfuerzo para atraer materia, pero si ésta cae de modo natural bajo la fuerza de la gravedad, le resultará imposible escapar. Los agujeros negros pueden considerarse una especie de torniquetes, que permiten el paso de la materia en una sola dirección: hacia dentro. A fuerza de engullir materia, tanto su masa como sus horizontes de sucesos aumentan constantemente, porque la región de invisibilidad también depende de la masa atrapada en el interior. Si existen realmente agujeros negros en el espacio, es probable que aumenten su masa y su tamaño, algunos más que otros, sin dejar nunca de engullir, comer y crecer.

Otra característica notable es que los potentes campos gravitacionales de los agujeros negros causan enormes presiones. El infortunado que cayera de pie en un agujero negro sería estirado hasta alcanzar una tremenda altura. Además, quedaría literalmente destrozado, porque la gravedad tendría más fuerza en sus pies que en su cabeza. No permanecería entero por más de una fracción de segundo después de pasar el horizonte de sucesos. Se puede aplicar una distorsión similar a cualquier clase de materia próxima a un agujero negro. Cualquier cosa que caiga en él — gas, personas, sondas espaciales, lo que sea — es alargada verticalmente y comprimida horizontalmente mientras sufre aceleraciones a altas velocidades. El resultado son numerosas y violentas colisiones entre los destrozados escombros, las cuales generan una gran cantidad de calor.

Este rápido calentamiento de la materia por aceleración y colisiones es tan eficiente que, antes de sumergirse bajo el horizonte de sucesos del agujero, la materia recién caída es transformada en energía termal durante su descenso. Aunque la radiación deja de ser detectable en cuanto la materia caliente desaparece bajo el horizonte de sucesos, las regiones próximas a los agujeros negros deben ser prodigiosas fuentes de energía.

Teniendo esto en cuenta, es posible que la investigación de los agujeros negros descubra algunas aplicaciones prácticas. Gracias a algún milagro de la tecnología, nuestros descendientes aprenderán tal vez a comprimir los desechos a un tamaño increíblemente pequeño. ¡Y a hacerlos desaparecer luego! Y no sólo esto, sino que los desechos comprimidos emitirían copiosas cantidades de energía. Quizá los agujeros negros son exactamente la solución para las civilizaciones tecnológicas rebosantes de polución y faltas de energía.

La siguiente pregunta tiene un interés considerable: ¿Qué hay dentro del horizonte de sucesos de un agujero negro? ¿Cómo es en su interior? Nadie lo sabe.

Algunos investigadores sugieren que el funcionamiento interior de los agujeros negros carece de relevancia. Podrían realizarse experimentos para averiguar la naturaleza del espacio y el tiempo dentro de un horizonte de sucesos, pero esta información jamás llegaría al resto de nosotros. Al parecer, ninguna teoría de las propuestas para explicar las profundidades de los agujeros negros puede alcanzar la fase de prueba experimental. Cualquier teoría es válida.

Es posible que los fondos de los agujeros negros representen la esencia de lo desconocido. Por esta misma razón, otros investigadores arguyen que es de máxima importancia desentrañar la naturaleza de los agujeros negros antes de que algún día empe-

cemos a adorarlos. Grandes sectores de la humanidad han venerado lo desconocido, aquello que no puede ser investigado experimentalmente. Y ahora que viene a cuento, ¿no es éste todavía el caso de muchos pueblos del siglo XX?

¿Qué sentido podemos atribuir a los agujeros negros? Las ecuaciones de la relatividad general formulan todos estos fenómenos fantásticos basándose sencillamente en que la masa distorsiona el espacio-tiempo. Cuanto mayor es la concentración de masa, más pronunciada es la distorsión y más misteriosas las consecuencias observadas. Tal vez sea así. Algunos teóricos aducen que la relatividad es incorrecta, o al menos incompleta, cuando se aplica a los agujeros negros. Admitamos que no tiene mucho sentido afirmar que los cuerpos astronómicos de gran masa se colapsan catastróficamente hasta quedar reducidos a puntos infinitamente pequeños. Ni la imaginación más calenturienta puede representarse este fenómeno. Quizá las actuales leyes de la física son insuficientes en las proximidades de una singularidad. Sabemos positivamente que *en* el punto de singularidad, la relatividad es un absurdo. Por otra parte, tal vez la materia atrapada en los agujeros negros no llega nunca a ser una singularidad. Quizá sólo se aproxima a este grotesco estado, en cuyo caso la teoría de la relatividad seguiría siendo válida. Los científicos todavía lo ignoran.

¿Dónde está la verdad? ¿Existen realmente los agujeros negros o son sólo producto de la fértil imaginación de los teóricos? Quizá todas las estrellas de gran masa explotan en pequeños pedazos como supernovas y nunca dejan ni un resto de núcleo. O quizá existe otra fuerza, hasta ahora no descubierta, capaz de competir con la gravedad pese a estas condiciones extremas de materia ultracondensada. Cuaquiera de estas posibilidades excluiría la existencia de agujeros negros. ¿Cuántas pruebas existen sobre este fenómeno basadas en la observación?

Pese al hecho de que son invisibles, se cree que continúan siendo intensos focos de gravedad. Por consiguiente, los astrónomos pueden probar su existencia examinando el campo gravitatorio del espacio que los rodea. La naturaleza de un agujero negro podría estudiarse examinando, por ejemplo, la reacción gravitatoria de una nave espacial o de un cuerpo celeste cercanos a él. De acuerdo con las previsiones teóricas, los cuerpos del exterior de un horizonte de sucesos se comportan como si hubiera un objeto visible y dotado de masa en el lugar del agujero. En otras palabras, cualquier prueba convencional de la existencia de un agujero negro desaparece, pero su fuerza de atracción persiste.

Nuestra civilización no tiene capacidad para maniobrar naves espaciales en la vecindad de supuestos agujeros negros, aunque conociéramos su situación exacta. Pero se sabe que la galaxia alberga numerosos sistemas de estrellas binarias cuyos miembros giran en órbitas que poseen un centro de gravedad común. Sin embargo, muchas veces sólo es visible una de ellas. Naturalmente, cada compañera invisible podría ser una estrella pequeña y débil, oculta en el resplandor de la mayor y más brillante. O el objeto podría estar envuelto en polvo u otro tipo de escombro interestelar, resultando así invisible para los instrumentos terrestres, pero sin ser necesariamente un agujero negro. De hecho, tal es probablemente el caso en la mayoría de sistemas de estrellas binarias con un miembro oculto; las candidatas invisibles no son agujeros negros.

Sin embargo, algunos de estos peculiares sistemas binarios exhiben propiedades que recuerdan a los agujeros negros. Los descubrimientos más interesantes, realizados en los años setenta, se refieren a estos sistemas binarios, que emiten grandes cantidades de radiación de rayos X. Esta radiación de alta frecuencia no puede atravesar fácilmente el polvo, lo cual invalida la hipótesis de que escombros galácticos hayan camuflado a una de las dos estrellas. De hecho, varios satélites que orbitan la Tierra equipados para detectar rayos X han observado recientemente este tipo de radiación en algunos sistemas binarios. Y en varios de estos casos sólo puede verse una estrella.

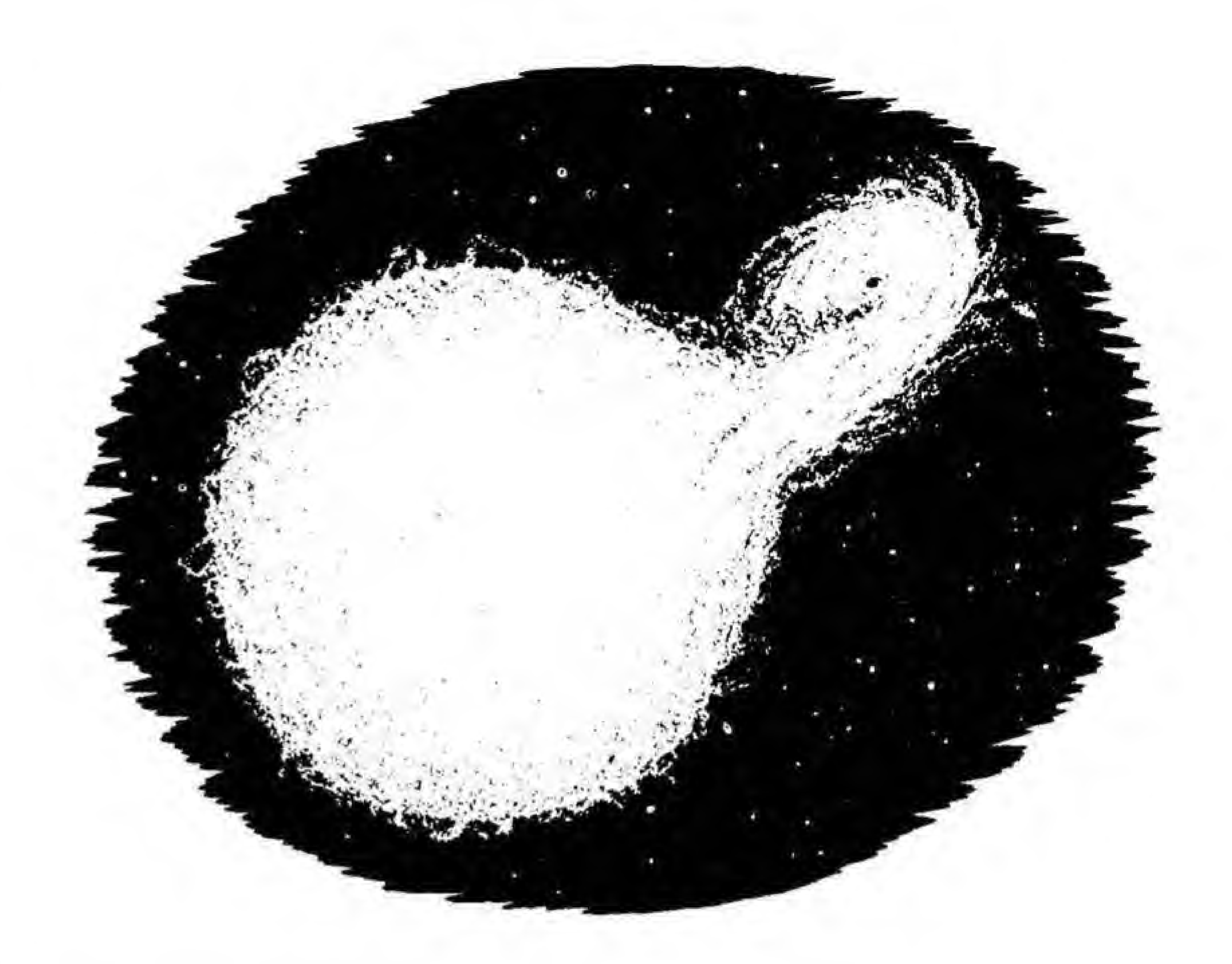
Las observaciones han demostrado que, en todos los casos, los rayos X emanan de un gas a más de mil millones de grados centígrados que fluye de una estrella grande y visible hacia una compañera pequeña e invisible. Además, cada región invisible contiene una masa de cinco a diez veces la del Sol y no ocupa más de cien kilómetros. Es decir, posee todas las características de los agujeros negros.

Los modelos de tanteo del sistema binario más próximo, que está situado a unos seis mil años luz de la Tierra, muestran que gran parte del gas procedente de la estrella visible acabará en un disco de materia plano y diminuto como una pastilla de menta. Parte de este gas fluye inevitablemente hacia el agujero negro y es atrapado por él.

Estas interpretaciones están plagadas de problemas, y uno de ellos es que todos los supuestos agujeros negros de los sistemas binarios poseen masas próximas a la línea divisoria entre la estrella neutrónica y el agujero negro. Cuando los efectos de la rotación y el magnetismo sean incorporados a la teoría, es posible que los oscuros objetos en cuestión sean reconocidos como estrellas neutrónicas muy opacas y no como agujeros negros.

Muchos investigadores alegan que hay otras clases de regiones mucho más merecedoras de ser clasificadas como agujeros negros. La exploración actual del centro de nuestra Vía Láctea, situado a unos treinta mil años luz de la Tierra, es especialmente interesante a este respecto. Aunque las regiones centrales de nuestra Galaxia están totalmente oscurecidas por el polvo y no pueden ser estudiadas con telescopios ópticos, las observaciones de las ondas de radio e infrarrojas de los centenares de años luz más próximos al centro han dado resultados imprevistos y espectaculares. Los datos obtenidos a finales de la década de los años setenta indican la presencia de gas caliente en rápida rotación, que podría significar un colosal remolino en el mismo centro de nuestra Galaxia.

Según el modelo teórico que sirve para explicar los datos observados, un halo de gas tenue, caliente e ionizado rodea un núcleo de gas más caliente y más denso. Se supone que toda esta región giratoria se mueve siguiendo una órbita —y esto es lo inesperado— en torno a una región cuya masa equivale a varios millones de soles, aunque de un tamaño apenas mayor que el de nuestro Sistema Solar. Es preciso que exista un cuerpo con una masa verdaderamente enorme para impedir que el gas en



rotación se disperse hacia las regiones exteriores de la Galaxia; la rápida rotación produce sin duda potentes fuerzas centrífugas y sin una masa enorme que compita por medio de su fuerza de atracción, el gas saldría despedido como el barro de las ruedas de una bicicleta.

Aunque los detalles son polémicos todavía, parece ser que se está llegando a un acuerdo de principio sobre lo siguiente: en el mismo centro de nuestra Vía Láctea hay un «algo» compuesto de extraordinaria masa, aunque de volumen ultrarreducido. Y prevalece la impresión de que este algo sólo puede ser una cosa: un agujero negro en el espacio.

Según recientes observaciones, algunos cuerpos de extraordinaria masa se ocultan cerca de las regiones centrales de otras galaxias vecinas. Aquí las pruebas se parecen bastante a las de nuestra galaxia: en la región central de varias radiogalaxias se ha observado la existencia de gas y estrellas en rotación rápida. Mediciones detalladas de estas galaxias indican además una región reducida que alberga una masa aún mayor que en el caso de nuestra galaxia normal. En realidad, parece que tienen una masa que supera en varios miles de millones de veces la del Sol. Quizá estos remolinos centrales son restos de los turbulentos torbellinos que dieron origen a las galaxias en una época anterior, y que ya hemos comentado. Pero es posible que el centro de cada galaxia esté habitado por un agujero negro de masa extraordinaria. Las galaxias normales como la nuestra tienen probablemente pequeños agujeros negros con una masa de «sólo» millones de veces la del Sol. Es de esperar que las radiogalaxias tengan agujeros negros más importantes, con masas quizá del orden de miles de millones de veces la del Sol. No olvidemos que, durante el proceso de engullir materia, los agujeros negros emiten ingentes cantidades de energía; la atracción de grandes cantidades de materia hacia el agujero acelera y calienta dicha materia, que emite gran parte de esta energía antes de desaparecer bajo el horizonte de sucesos. La energía y explosividad de las radiogalaxias podrían explicarse por la desaparición de materia en las fauces de agujeros negros de extraordinaria masa.

Incluso es posible que los objetos más energéticos del Universo — los quasars — sean alimentados por agujeros negros que engullan estrellas enteras. Aunque las observaciones no hayan facilitado ninguna prueba que la apoye, esta idea es una mera extensión de los argumentos expuestos más arriba. De ser cierta, los agujeros negros de los quasars poseerían aún más masa, y serían más reducidos y más grotescos que esos objetos con una masa de miles de millones de veces la del Sol, que llamamos radiogalaxias.

Como ya hemos observado, es evidente que el secreto de las radiogalaxias se oculta en sus corazones esperando que los astrofísicos del futuro descubran, despejen y compartan sus incógnitas.

Se impone una palabra final de advertencia en relación con los agujeros negros. Campos energéticos aún no descubiertos pueden ser capaces de contrarrestar la implacable fuerza de la gravedad, incluso la que está próxima a los cuerpos astronómicos enormemente compactos. El magnetismo y la rotación no han sido todavía incorporados del todo a la teoría de los agujeros negros, y nadie sabe a qué atenerse con respecto al comportamiento de la gravedad a escalas microscópicas. No cabe duda de que son problemas muy difíciles, tan complicados que algunos de los mejores cerebros confiesan desconocer el modo de enfocarlos. En realidad, la investigación seria sobre modelos realistas de agujeros negros no ha hecho más que empezar.

A menos que los astrofísicos puedan encontrar pruebas directas o indirectas indiscutibles de la existencia de agujeros negros, lo cual no ha ocurrido hasta el momento, todo el concepto de agujeros negros puede resultar un mero capricho de la fantasía humana, otro mito a considerar culpable hasta que se pruebe su inocencia. La naturaleza de la materia, la energía, el espacio y el tiempo en el interior de los horizontes de sucesos puede tener menos relevancia que cualquier intrigante y divertido problema académico desprovisto de toda realidad.

Por otra parte, no debemos olvidar que el Universo surgió de lo que parece haber sido una neta singularidad hace más de diez mil millones de años. Entre todas las condensaciones de materia que ahora forman parte de nuestro inventario universal, las singularidades del agujero negro podrían ser las claves que nos hicieran comprender la singularidad definitiva. Estudiando teóricamente la naturaleza de los agujeros negros, y en especial, buscando su existencia por medio de observaciones e investigando su comportamiento, quizás algún día estemos en mejor posición para abordar el problema más fundamental de todos: el origen del propio Universo.

ÉPOCA CUARTA

Los planetas

HÁBITATS PARA LA VIDA



Los planetas son globos de materia, mucho menores que las estrellas y compuestos en su mayor parte de elementos pesados. Estos mundos no se podrían haber formado al principio del Universo, cuando los elementos pesados no existían.

Los planetas tuvieron que esperar el nacimiento y la muerte de innumerables estrellas de gran masa, que al parecer son los únicos lugares adecuados para la creación de elementos pesados. La muerte estelar asegura una fertilización continua del espacio interestelar, de la que pueden nacer más tarde otras generaciones de estrellas y, además, los planetas. Éstos son, pues, literalmente, agrupaciones de cenizas de estrellas ya quemadas.

El grupo planetario en que vivimos es muy variado. Conocido como Sistema Solar, incluye a una estrella, nueve planetas, al menos tres docenas de satélites, millares de asteroides cuyo diámetro oscila entre uno y varios centenares de kilómetros, miríadas de cometas de dimensiones kilométricas e innumerables meteoritos interplanetarios de menos de un metro de diámetro. La distancia entre la Tierra y el Sol — más de cien millones de kilómetros — se llama unidad astronómica, y todo el Sistema Solar mide de extremo a extremo casi ochenta unidades astronómicas. Esta cantidad puede parecer grande, pero en realidad es menos de la milésima parte de un año luz.

Los cuatro planetas interiores, Mercurio, Venus, Tierra y Marte son llamados con frecuencia Planetas Terrestres a causa de su similitud física y química con la rocosa Tierra. Los planetas ex-

teriores, de mayor tamaño, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, reciben el nombre de Planetas Jovianos por su parecido con el gaseoso Júpiter. Entre estos dos grupos, en una banda bien definida que dista dos o tres unidades astronómicas del Sol, erran los pétreos asteroides, a veces denominados «planetas menores» o incluso «planetoides». Plutón, en general el planeta más externo (aunque a veces se aventura dentro de la órbita de Neptuno, como hizo en 1979), no encaja bien en ninguna de estas categorías; probablemente en su origen no fue un planeta, sino un satélite de Neptuno.

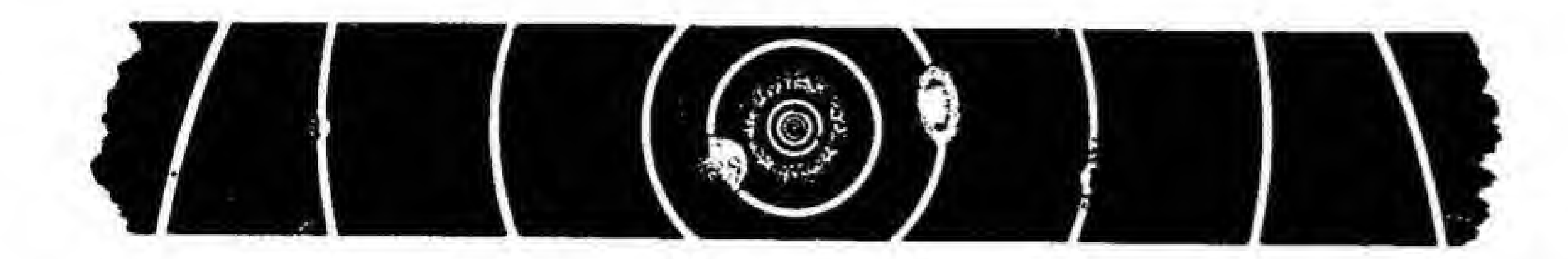
Visto desde un punto lejano, el Sol domina, seguido de lejos por Júpiter. Nuestra estrella tiene una masa mil veces mayor que la de Júpiter y setecientas veces mayor que todo el resto del Sistema Solar, incluyendo a Júpiter. Así pues, el Sol contiene más del 99,9 por ciento de toda la materia del Sistema Solar. Todo lo demás, en especial los pequeños Planetas Terrestres y notablemente la Tierra, parece una colección de escombros casi insignificantes.

Haremos una distinción en el caso de Júpiter, porque no es un cuerpo celeste corriente. De hecho, Júpiter estuvo a punto de convertirse en estrella. La composición y estructura de este planeta gigante — y posiblemente de todos los Planetas Jovianos — son estelares. Pero ninguno de ellos es lo bastante grande para encenderse. Si Júpiter tuviera una masa sólo cien veces mayor, su temperatura central sería justo la necesaria para iniciar las reacciones nucleares que lo convertirían en una pequeña estrella. Así, nuestro Sistema Solar casi se formó como un sistema de estrellas binarias, una situación astronómica que indudablemente habría hecho imposible la vida en la Tierra.

Tenemos una deuda de gratitud con el Sol por encenderse, y con Júpiter por no hacerlo.

La aparente complejidad primitiva de los numerosos cuerpos de nuestro Sistema Solar fue muy simplificada en tiempos del Renacimiento. Mirar (observación) y pensar (teoría) se amalgamaron para lograr una visión más objetiva que la deducida por los antiguos. El clérigo polaco del siglo XVI, Nicholas Copernicus, reconoció que un modelo heliocéntrico (centrado en el Sol) mejoraba la armonía de los intrincados modelos geocéntricos (centrados en la Tierra) imaginados por los griegos y romanos.

Pese al apoyo de los datos facilitados por la observación y al soporte matemático de dos gigantes del siglo XVII, Kepler y Newton, el modelo más sencillo de Copérnico no era muy fácil de aceptar hace tan sólo trescientos años. La heliocentricidad contradecía todas las teorías anteriores y violaba las enseñanzas



religiosas de la época. Y ante todo, relegaba a la Tierra a un lugar apartado y secundario del Sistema Solar y el Universo. La Tierra se convertía en uno más de los planetas.

Aunque ahora reconocemos que aquellos pensadores del Renacimiento tenían razón, ninguno de ellos fue capaz de probar a sus contemporáneos que nuestro sistema tiene como centro el Sol, y que la Tierra se mueve. La prueba de esto último llegó a principios del siglo XIX cuando el astrónomo-matemático alemán Friedrich Bessel realizó las primeras observaciones de los paralajes estelares. La heliocentricidad del Sistema Solar ha sido verificada gradualmente con los años mediante una serie siempre creciente de pruebas experimentales que culminaron con las expediciones de nuestras sondas espaciales no tripuladas de las dos últimas décadas.

La motivación inicial para el modelo heliocéntrico fue su sencillez. Ofrece una explicación más natural de los hechos observados que ningún otro modelo geocéntrico. Incluso hoy, los científicos se guían por la sencillez, simetría y belleza al confeccionar modelos de todos los aspectos del Universo.

El desarrollo y la aceptación final del modelo heliocéntrico es un hito importante de nuestro pensamiento como seres humanos. La elaboración de un marco para nuestro sistema planetario nos liberó de una visión del Universo en que la Tierra fuese el centro, y nos permitió comprender que la Tierra gira sólo en torno a una de las miriadas de estrellas similares de la Galaxia. Por sorprendente que parezca, hasta hace poco más de medio siglo no dio el astrónomo americano Harlow Shapley el siguiente paso audaz al declarar que nuestro Sol no sólo no era el centro, sino que tampoco era único o especial en ningún aspecto. Cuanto más observamos y cuantas más pruebas hacemos, más mediocre parece ser nuestra hornacina en el Universo.

Cualquier modelo capaz de explicar el origen y la arquitectura de los planetas y sus satélites debe ajustarse a los hechos conocidos. En general, estos hechos se deben a estudios de nubes interestelares, meteoritos, la Luna, y de diversos planetas observados ahora con telescopios terrestres y sondas espaciales interplanetarias. Los meteoritos ofrecen una información especialmente útil porque han atrapado trazas de materia sólida y gaseosa no erosionada del primitivo Sistema Solar. La estimación radiactiva de la edad de los meteoritos sugiere uniformemente que el Sistema Solar, con el Sol y la Tierra, se formó hace aproximadamente cinco mil millones de años. Estudios de rocas terrestres y lunares confirman en general esta fecha.

Entre las numerosas propiedades observadas de nuestro Sistema Solar, destacan siete, que pueden resumirse como sigue:

Cada planeta está relativamente aislado en el espacio, sin formar grupo con ningún otro; y cada uno se encuentra más o menos a doble distancia del Sol que su vecino interior más inmediato.

Las órbitas de los planetas describen círculos casi perfectos; la ligera excentricidad orbital del planeta Mercurio, el más interno, se debe a las grandes presiones ejercidas sobre él por el vecino Sol, mientras la de Plutón puede explicarse por la suposición de que este planeta, el más externo de todos, fue un satélite de Neptuno que se escapó.

Casi todas las órbitas de los planetas se hallan en el mismo plano; cada uno de los planos recorridos por las órbitas se alinea con los otros con diferencias de pocos grados, y todo el sistema adopta la forma de un disco bastante delgado.

El sentido de rotación de los planetas mientras giran alrededor del Sol es el mismo que el del Sol sobre su eje; prácticamente todo el momento angular del Sistema Solar — las órbitas de los planetas y la rotación del Sol — parece estar sistematizado, lo cual sugiere un alto grado de armonía.

La dirección de la rotación axial de los planetas también es la misma que la del Sol; las dos excepciones son Venus, que parece girar en dirección contraria, y Urano, cuyos polos parecen estar en el plano de la órbita del planeta.

La mayoría de satélites conocidos gira alrededor de sus planetas maternos en la misma dirección que los planetas giran sobre sus ejes; algunos, como los asociados con Júpiter, parecen formar sistemar solares en miniatura, girando en torno a su planeta materno en casi el mismo plano que el ecuador de dicho planeta, sugiriendo también un alto grado de armonía en todos los aspectos de nuestro sistema planetario.

Por último, el Sistema Solar está altamente diferenciado; los Planetas Terrestres internos se caracterizan por elevadas densidades, atmósferas moderadas, rotación lenta y pocos o ningún satélite, mientras los externos, los Planetas Jovianos, tienen densidades bajas, atmósferas espesas, rotación rápida y numerosos satélites.

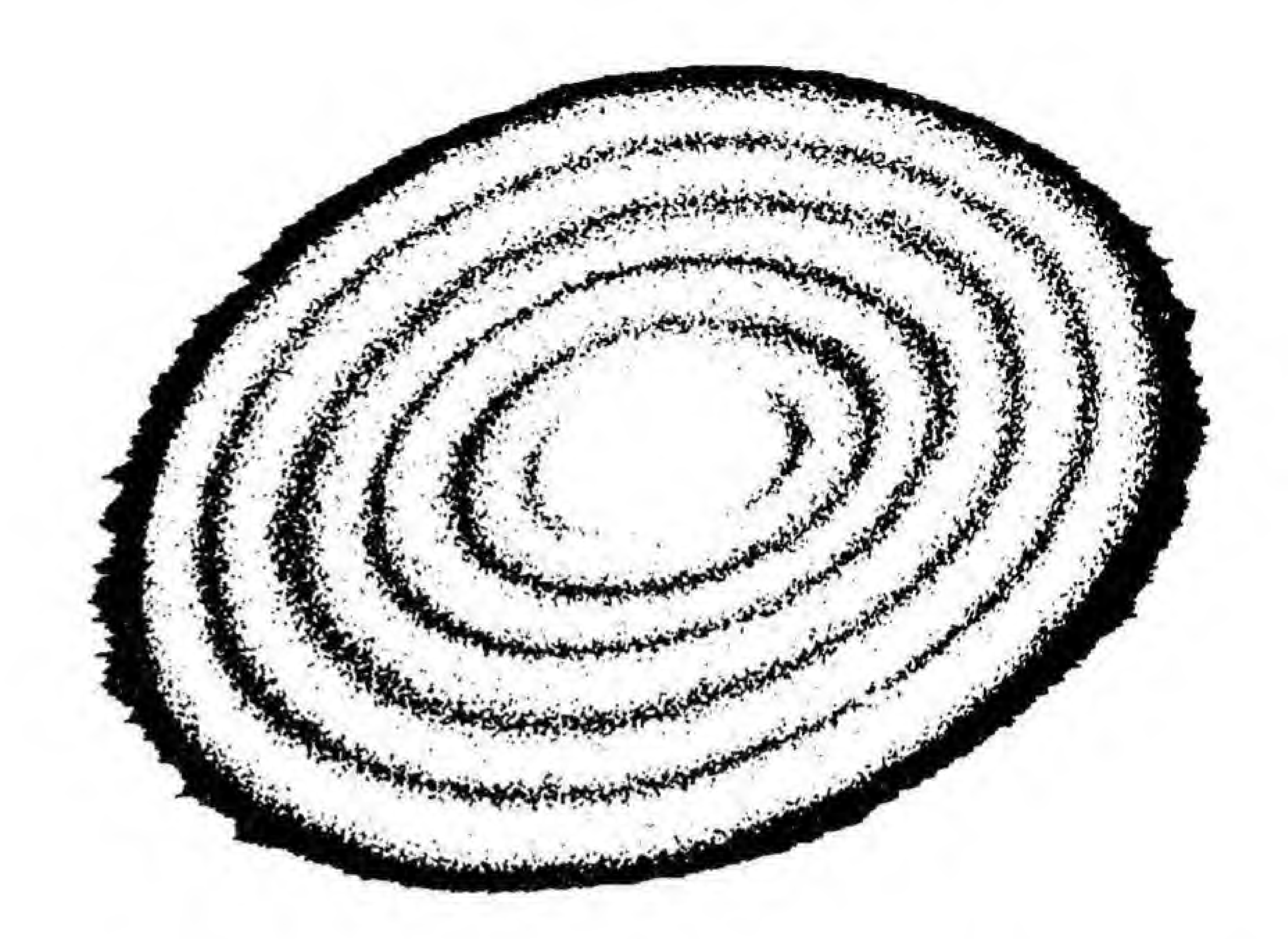
En su conjunto, todos estos hechos observados indican claramente que existe un alto grado de orden en nuestro Sistema So-

lar. Parece ser que todo el conjunto no es una agrupación casual de objetos que giran sobre sus ejes u orbitan de manera accidental y sin orden ni concierto. Se antoja imposible que el Sistema Solar sea una aglomeración fortuita, amasada por la lenta acumulación de «planetas» interestelares ya formados, captados accidentalmente por nuestro Sol en el transcurso de miles de millones de años. La arquitectura global de nuestro Sistema Solar es demasiado elaborada, y las edades de sus miembros demasiado uniformes para ser resultado de una larga serie de circunstancias casuales. Todos los indicios apuntan hacia una formación conjunta, producto de un hecho antiguo, pero aislado.

Aunque hace dos siglos no fueron reconocidas todas estas propiedades, lo esencial de la teoría moderna sobre la formación de nuestro Sistema Solar data de aquella época. Conocida como hipótesis de la condensación, su origen suele atribuirse a Immanuel Kant, aunque él se limitó a desarrollar una propuesta anterior hecha en el siglo XVII por el filósofo francés René Descartes. En este modelo se visualiza una gigantesca región de materia arremolinada que da origen a los planetas y a sus satélites como resultado natural del proceso de formación estelar. Pero estos filósofos olvidaron los detalles matemáticos de su modelo, y sus propuestas no pasaron de ser ideas cualitativas.

En el siglo XVIII, un matemático-astrónomo francés llamado Pierre Simon de Laplace intentó dar a este tipo de modelo una base cuantitativa. Logró demostrar matemáticamente que el momento angular exige que la materia en contracción de un fragmento interestelar gire con mayor rapidez; una disminución en el tamaño de una masa en rotación debe equilibrarse con un incremento de su velocidad de rotación, de modo parecido al patinador, que gira más deprisa con los brazos pegados al cuerpo, o al saltador de trampolín que para girar sobre sí mismo enrosca sus miembros. El fragmento se aplana por fin para convertirse en un Sistema Solar primitivo con forma de hojuela, por la sencilla razón de que la gravedad puede atraer a la materia hacia el centro de la región con mayor facilidad por el eje de rotación que perpendicularmente a él. Este modelo ofrece un origen plausible de una parte de la ordenada arquitectura que vemos hoy en nuestro Sistema Solar: la circularidad de las órbitas planetarias, su distribución en un mismo plano y muchas de las otras propiedades mencionadas más arriba. Todo ello es un mero producto de los cambios naturales experimentados por un fragmento interestelar, la obediencia directa de una fracción de gas galáctico a las conocidas leyes de la física.

La contracción continuada de este primitivo Sistema Solar



obliga a toda la masa a girar más rápidamente a medida que pasa el tiempo. Cerca del borde, la fuerza centrífuga excede eventualmente a la fuerza de la gravedad, creando un anillo plano de materia gaseosa que se separa del resto del Sistema Solar primitivo. Entonces el resto del sistema se contrae un poco más, hasta que otro anillo de materia se sedimenta dentro del primero. Progresando de este modo, se puede formar toda una serie de anillos alrededor del protosol central. Además, parece que cada anillo se condensa durante largos intervalos de tiempo hasta convertirse en un planeta. Varios planetas externos pudieron desarrollarse mientras que en el interior del primitivo Sistema Solar se continuaban formando los planetas internos y el Sol.

Por bonita que parezca esta hipótesis de la condensación, no carece de dificultades. Computaciones detalladas demuestran que el material de un anillo semejante no se condensaría necesariamente hasta formar un planeta. De hecho, recientes cálculos de computadora predicen exactamente lo contrario; los anillos tenderían a dispersarse, debido a la abundancia de calor y la falta de masa en cualquiera de ellos. La condensación gravitatoria de materia interestelar es una cosa; funciona razonablemente bien cuando se fabrican estrellas porque, después de todo, hay una ingente cantidad de masa en una nube interestelar nor-

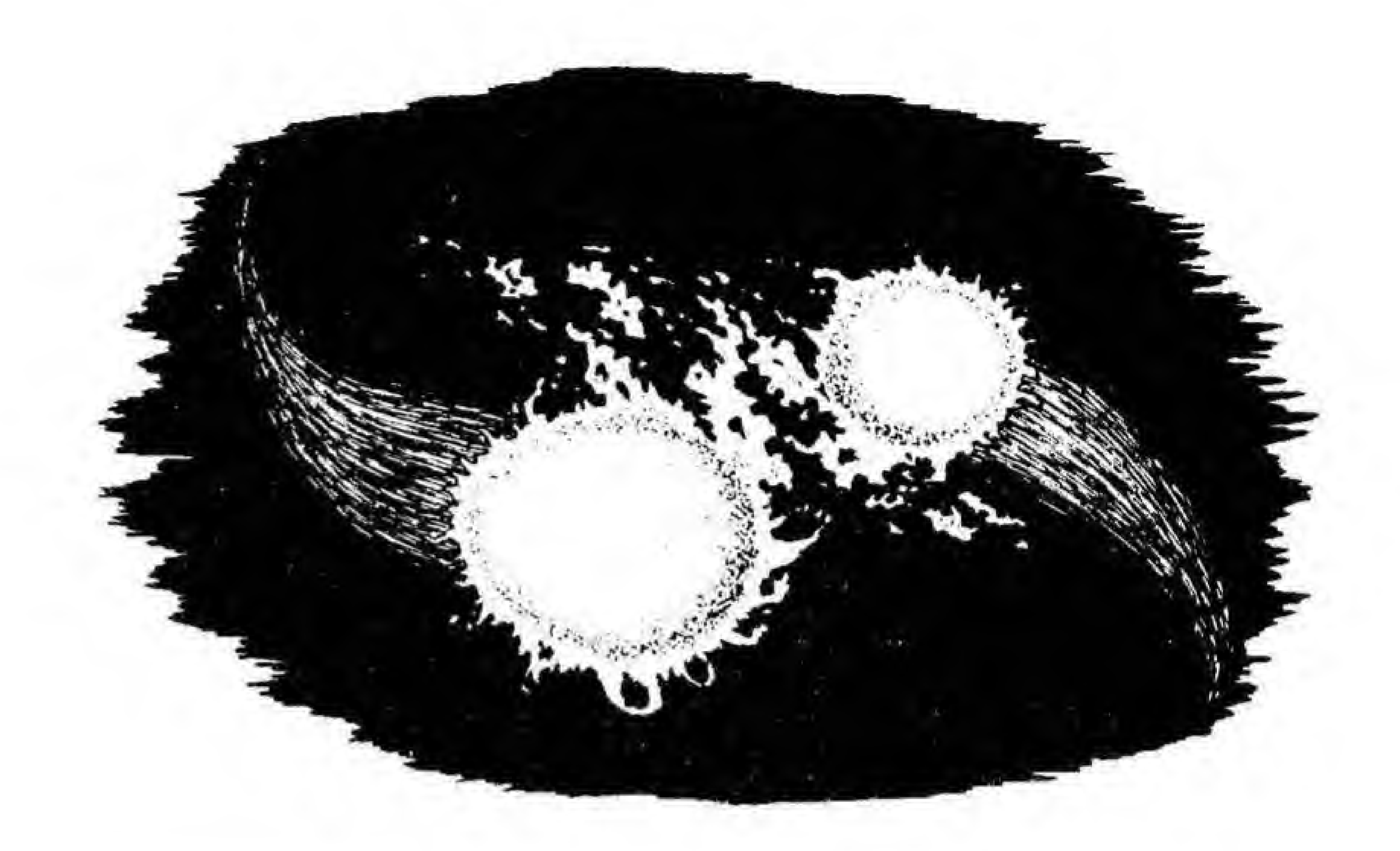
mal. Pero la condensación de un anillo caliente protoplanetario es algo distinto; no hay materia suficiente para que la gravedad le dé la forma de un globo de tamaño planetario. En lugar de condensarse hasta formar un planeta, los cálculos de las computadoras afirman que el anillo se escindirá y dispersará.

No seamos demasiado duros con Laplace. No tenía computadora, y sin ella es muy complicado y tedioso tener en cuenta todas las sutilezas estadísticas de este problema.

La hipótesis de que el origen del Sistema Solar fue la condensación ofrece otro problema. El Sol gira sobre su eje una vez cada treinta días, mucho más lentamente que la Tierra, cuya rotación dura veinticuatro horas. Esta lentitud solar desconcierta a los expertos. ¿Por qué? Aunque el Sol contiene casi toda la materia del Sistema Solar, sólo posee un dos por ciento del momento angular de todo el sistema. Júpiter, por ejemplo, tiene mucho más momento que nuestro Sol. El planeta no gira demasiado sobre su eje, pero un cuerpo con la considerable masa de Júpiter a tanta distancia del Sol lleva gran cantidad de momento en su órbita. De hecho, Júpiter alberga más de la mitad del actual momento angular del Sistema Solar. En conjunto, los cuatro grandes Planetas Jovianos poseen aproximadamente el noventa y ocho por ciento del actual momento del Sistema Solar. En comparación, los más ligeros Planetas Terrestres tienen un momento insignificante.

Según la hipótesis de la condensación el Sol debe poseer la mayor parte del momento angular del Sistema Solar. Después de todo, tiene la mayoría de su masa. ¿Por qué no habría de tener la mayoría de su momento? Esto es especialmente cierto teniendo en cuenta que los objetos contraídos deben incrementar el ritmo de su rotación. Expresado de otra manera: Si todos los planetas, con sus grandes cantidades de momento orbital, fueran depositados hipotéticamente en el interior del Sol, la rotación axial de éste sería cien veces más rápida que la actual. En vez de girar una vez cada mes, el Sol giraría una vez cada pocas horas.

Estas y otras dificultades de la hipótesis de la condensación obligó a los investigadores a considerar otros modelos. Uno de éstos se llama hipótesis del encuentro o, más popularmente, hipótesis de la colisión. En él se visualizan los planetas como productos condensados de escombros calientes expulsados de nuestro Sol durante un acercamiento a otra estrella. Los rayos ígneos producidos por este amago de colisión permanecieron gravitacionalmente atraídos por nuestro Sol por la fuerza de la gravedad, siendo captados más tarde hacia órbitas en torno a él y



convertidos finalmente en planetas. Pese a las fenomenales mareas que sin duda acompañarían al amago de colisión de dos estrellas, las consecuencias predichas concuerdan con la orientación común de las órbitas planetarias y la rotación solar, así como con el alineamiento en un mismo plano de todos los planetas.

Aunque este modelo fue propuesto también durante el siglo XVIII, el entusiasmo moderno con respecto a él se reanimó hace cien años, cuando resultó evidente que había varias excepciones menores en la ordenada arquitectura de nuestro sistema planetario. La absoluta sencillez del Sistema Solar se vino abajo, provocando un aluvión de modelos basados en catástrofes, modelos que invocan acontecimientos celestes accidentales e improbables.

Aunque la hipótesis del encuentro tiene algunos puntos cualitativos a su favor también tiene su parte de escollos. La elevada improbabilidad de que colisionen dos estrellas es el problema principal. Las estrellas son grandes según los patrones terrestres, pero minúsculas si las comparamos con las distancias que las separan. Por ejemplo, el Sol tiene aproximadamente un millón de kilómetros de diámetro, mientras que la distancia entre él y Alfa Centauri, el sistema estelar más próximo, es de casi cien billones de kilómetros. La teoría de la probabilidad sugiere que dado el número de estrellas, sus tamaños y las distancias que las separan, no pueden haberse producido más que unas pocas colisiones de esa clase en toda la extensión y toda la historia de

la Vía Láctea. Las colisiones entre galaxias son frecuentes, pero entre estrellas son extremadamente raras.

La improbabilidad de semejante colisión no prueba, naturalmente, que la hipótesis del encuentro esté equivocada. Después de todo, nuestro Sistema Solar podría ser el ejemplo más destacado —incluso el único— de este insólito fenómeno. De ser correcta esta hipótesis, deberíamos concluir que nuestro sistema planetario es un tipo singular de región astronómica. Muy pocas estrellas tendrían planetas, y las posibilidades de vida extraterrestre disminuirían sensiblemente.

Además de las escasas probabilidades de que ocurra una colisión, la idea del origen planetario debido a encuentros de cualquier clase presenta otras dificultades. En primer lugar, el enigma del momento, ya encontrado en la hipótesis de la condensación, es también un problema aquí. En segundo lugar, y este escollo es mucho peor, resulta difícil comprender cómo podría haberse contraído un material caliente expulsado del Sol; los gases calientes suelen dispersarse. Por consiguiente, aunque semejante amago de colisión entre dos estrellas cabe dentro de lo posible, es improbable que los fragmentos calientes formaran planetas. Algunos de los rayos volverían a caer en el Sol y otros tenderían a dispersarse más deprisa que la materia de los anillos más fríos en la hipótesis de la condensación. El tercer problema concierne a las órbitas casi circulares descritas por cada uno de nuestros planetas. Si la materia hubiera sido arrancada del Sol en un cataclismo para acabar formando los planetas, ¿cómo se explica que esos grupos de escombros acabaran orbitando a este mismo Sol en un círculo casi perfecto? La hipótesis del encuentro no puede explicar este hecho, ni siquiera como excepción.

Otro modelo de la formación del Sistema Solar, el apoyado por la mayoría de astrofísicos, se llama hipótesis de las nebulosas. En realidad, se trata de una versión aumentada de la hipótesis de la condensación ya comentada. Combina todas las características atractivas de la vieja hipótesis de la condensación con nuestra evaluación, recientemente revisada, de la química interestelar. Ahora los teóricos pueden confeccionar una hipótesis de las nebulosas que reduzca algunos de los problemas mencionados más arriba.

Recordemos que el primer problema de la hipótesis de la condensación se refería a la incapacidad del material de los anillos para coagularse en una apretada bola de materia protoplanetaria; se suponía que cada uno de los anillos tenía poca masa y demasiado calor para iniciar la contracción gravitatoria. Sin embargo, durante la última década se le ha dado un nuevo giro a esta cuestión. Los astrofísicos se han percatado de la ubicuidad y la importancia de los granos de polvo del espacio interestelar.

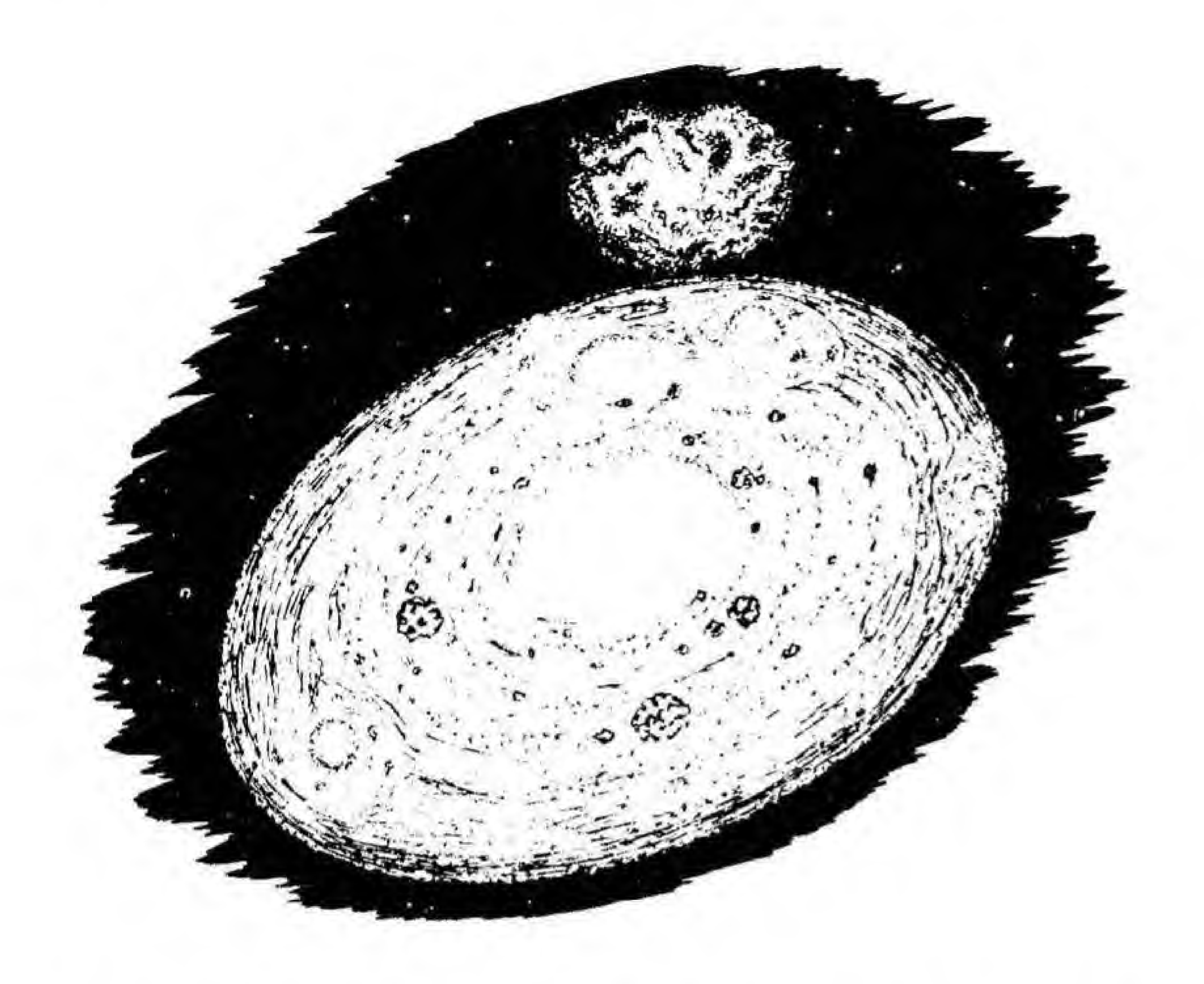
Los granos de polvo, sólidos cuerpos microscópicos de roca y hielo, juegan un papel crucial en la evolución de cualquier gas. El modelo de las nebulosas da por sentado que el polvo, al salpicar el gas caliente del Sistema Solar primitivo, ayuda a enfriarlo irradiando eficientemente el calor lejos de las gotas protoplanetarias. Además, los granos de polvo intensifican la aglomeración de los átomos dentro del gas, actuando de núcleos de condensación alrededor de los cuales pueden añadirse otros átomos. La presencia de polvo garantiza la condensación de la materia gaseosa al enfriarla por debajo del punto en que la presión hacia fuera puede competir eficazmente con la gravedad.

Después de postular que hace cinco mil millones de años existió una nebulosa de polvo interestelar, los teóricos afirman ahora que el enfriamiento por granos de polvo ocurrió antes de que el gas tuviera ocasión de dispersarse. De este modo, las observaciones modernas de materia de polvo interestelar sugieren —aunque no prueban— la probabilidad de agrupación y no de dispersión de la materia protoplanetaria.

Para seguir la pista de las fases formativas de un sistema planetario como el nuestro, los modernos modelos de nebulosas estipulan el siguiente esquema global. Imaginemos una porción de nube de polvo interestelar que mida un año luz de diámetro. Mezclada con la habitual abundancia de átomos de hidrógeno y helio, la nube alberga algún elemento pesado de gas y polvo, una acumulación de materia expelida por muchas supernovas del pasado. Las inestabilidades gravitatorias hacen que la porción se contraiga hasta alcanzar el tamaño de cien unidades astronómicas, tras lo cual densos remolinos protoplanetarios se forman espontáneamente.

Estas inestabilidades podrían haber sido causadas por muchos motivos, pero el criterio aceptado por los astrónomos es que probablemente la culpable fue otra supernova. Anomalías en las abundancias elementales de meteoritos capturados sugieren que la formación de nuestro Sistema Solar pudo ser provocada por la explosión de una supernova cercana hace cinco mil millones de años. La explosión habría enviado una onda de choque a través de la nube interestelar, amontonando la materia en densas láminas, de modo parecido al amontonamiento de nieve tras el paso de un vehículo provisto de palas.

Los cálculos demuestran que cuando una onda de choque encuentra una nube interestelar, rodea el tenue exterior de la nube más rápidamente de lo que atraviesa el denso interior. Las on-



das de choque no llegan a la nube desde una sola dirección; la comprimen desde muchas direcciones. Las pruebas con bombas atómicas han demostrado experimentalmente esta compresión: las ondas de choque creadas por el estallido rodean a los edificios, que se desploman hacia dentro (implosionar) y no hacia fuera (explosionar). De modo análogo, las ondas de choque pueden causar la compresión inicial de una nube interestelar, tras lo cual las naturales inestabilidades gravitatorias la dividen en porciones que forman gradualmente estrellas y planetas. Es desde luego una ironía que sea necesaria la muerte de estrellas viejas para la concepción de otras nuevas.

Una vez pasada la onda de choque, turbulentos remolinos de gas aparecerían en diversos puntos del primitivo Sistema Solar en rotación, cuya mayor parte, a estas alturas, ya se habría convertido en un disco plano. Como en los casos anteriores de formación galáctica y estelar, estos remolinos se deberían a fluctuaciones alternas en la densidad del gas. En cuanto un remolino consiguiera arrastrar la materia suficiente en su órbita alrededor del protosol, sólo la gravedad ya aseguraría la formación de un planeta. El proceso podría compararse a una bola de nie-

ve que diera vueltas bajo una tormenta, aumentando de tamaño al incorporar más nieve. Así pudieron fabricarse los planetas individuales, asimilando la mayor parte de materia fría a diferentes distancias del protosol. Suponiendo que el proceso de «barrido» fuese razonablemente eficaz en todo el disco, podemos comprender un poco cómo empezó a existir nuestro actual Sistema Solar en forma de pequeños planetas girando en una región vacía del espacio.

Es de suponer que los satélites naturales o lunas de los planetas se formaron de modo similar, como remolinos aún más pequeños condensados en la vecindad de sus planetas maternos.

Los modelos matemáticos indican que el Sistema Solar primitivo necesitó cien millones de años para desarrollar nueve remolinos protoplanetarios, docenas de protolunas y un gran remolino protosolar en el centro. Se estima que se requirieron otros mil millones de años para limpiar el sistema de desechos interplanetarios.

El eslabón más débil de la hipótesis de las nebulosas es, una vez más, la anómala pequeñez del momento de nuestro Sol actual. Todos los modelos matemáticos requieren que el Sol haya girado muy deprisa en las primeras épocas del Sistema Solar. Por alguna razón debió perder prácticamente toda la fuerza de su rotación, pero aún no se ha llegado a ningún acuerdo sobre cómo ocurrió.

Algunos investigadores especulan sobre el «viento» solar, descubierto en la década de los años sesenta por ingenios espaciales no tripulados, aduciendo que éste puede ser el problema. Las partículas elementales de alta velocidad que escapan continuamente del Sol a través de erupciones y otras tormentas de superficie podrían retrasar la rotación solar. Las partículas expelidas por el Sol deben contener cantidades minúsculas del momento angular solar y en el transcurso de cinco mil millones de años podrían haber arrebatado al Sol una fracción de su momento inicial. Vehículos espaciales tripulados y no tripulados intentan ahora medir la intensidad de la actividad solar, aunque será mucho más difícil todavía calcular el nivel de actividad de hace miles de millones de años.

Otros investigadores prefieren resolver el problema del momento solar postulando que el Sistema Solar primitivo constaba de una masa considerablemente mayor que el sistema actual. Arguyen que el proceso de asimilación no fue muy efectivo durante las fases de formación del sistema. La materia no capturada por el Sol o los planetas pudo transportar algo de momento mientras se perdía en el espacio interestelar. Esta proposición

es difícil de probar, ya que la materia fugada podría encontrarse fuera del alcance de nuestras actuales sondas espaciales.

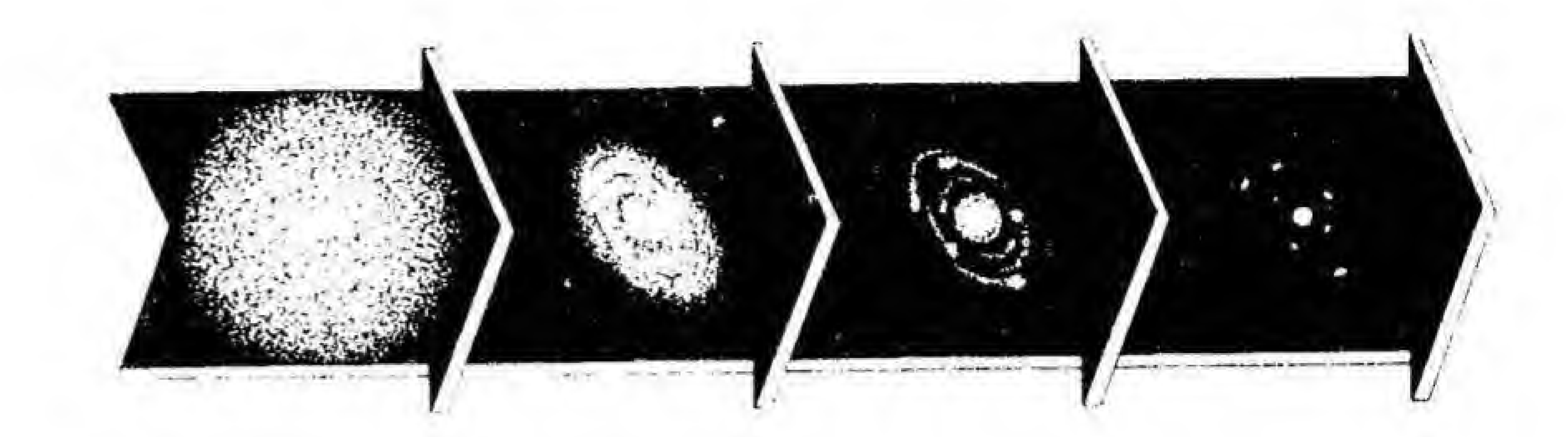
Pese a las controversias sobre cómo resolver mejor este problema del momento solar, casi todos los astrofísicos están de acuerdo en que alguna versión de la hipótesis de las nebulosas debe ser la apropiada. Sin embargo, los detalles que aún no han sido elaborados forman la esencia de un problema muy inquietante que tienen planteado actualmente varios observatorios de todo el mundo.

La diversidad de condiciones físicas en los primeros años del Sistema Solar es probablemente responsable del gran contraste entre los Planetas Terrestres y Jovianos. Cuando el Sistema Solar primitivo se contrajo como resultado de la gravedad, también se calentó y aplanó. Los granos de polvo se convirtieron en moléculas, y éstas a su vez en átomos. Como la densidad (y por ende el porcentaje de las colisiones) debía ser mucho mayor cerca del protosol, la materia situada allí estaría más caliente que en las regiones exteriores del Sistema Solar primitivo. Los cálculos indican que mientras la temperatura del gas era de varios miles de grados centígrados cerca del centro del sistema en contracción, a diez unidades astronómicas de distancia, donde se encuentra ahora Saturno, debía ser sólo de varios centenares de grados.

Semejante gas no puede continuar calentándose indefinidamente, pues la región estallaría. Como cualquier gas caliente, el Sistema Solar primitivo debió emitir una parte de su recién adquirida energía. Así pues, mientras el protosol continuaba calentándose al contraerse, las regiones externas del sistema primordial se enfriaban. Como resultado, los elementos pesados que distaban varias unidades astronómicas del centro del protosol, debieron cristalizarse y pasar de la fase de gas más caliente a la fase sólida más fría. (El mismo proceso tiene lugar ahora, aunque a una escala menor, en la Tierra, cuando gotas de lluvia, copos de nieve y gránulos de granizo se condensan en el aire húmedo y frío.)

Con el paso del tiempo la temperatura disminuyó en todas las regiones, excepto en el mismo centro, donde se estaba formando el Sol. Más allá del protosol, los átomos volvían por doquier a sus estados de reposo, tras lo cual algunos colisionaron y se unieron para formar moléculas, que a su vez se agruparon para formar nuevamente granos de polvo.

Podría parecer divertido que, pese a la existencia original de grandes cantidades de granos de polvo interestelar, la naturaleza optara por destruirlos sólo para volver a formarlos más tar-



de. Sin embargo, durante este proceso sobrevino un cambio importante. Inicialmente, el gas interestelar estaba salpicado uniformemente de todas clases de granos de polvo. Cuando éstos volvieron a formarse más tarde, la mezcla era muy diferente, porque la condensación de polvo sólido del gas caliente depende de la temperatura. En otras palabras, el calentamiento de la contracción sirvió para esterilizar toda la región, preparándola así para un Sistema Solar de composición planetaria altamente diversificada.

En las regiones exteriores del primitivo sistema planetario, a varias unidades astronómicas del centro, la temperatura sería idónea para la condensación de varios gases y su conversión en sólidos. A temperaturas de doscientos grados centígrados o menos, los elementos pesados razonablemente abundantes como oxígeno, carbono y nitrógeno, se mezclaron con el elemento más abundante, el hidrógeno, para formar varias sustancias químicas bien conocidas, como el agua, el amoníaco y cristales de hielo de metano. (El helio es un elemento inerte y no se mezcla químicamente con otros átomos.) Los fragmentos ancestrales destinados a convertirse en los Planetas Jovianos se formaron en condiciones bastante frías gracias a inestabilidades gravitacionales muy parecidas a las mencionadas más arriba en relación con la formación de galaxias y estrellas.

Los microscópicos granos de hielo que orbitaban el disco nebuloso colisionaron y se unieron de modo gradual, fabricando aglomeraciones de hielo cada vez mayores, de manera bastante parecida al paulatino aumento de tamaño de una bola de nieve. Ahora ya sabemos que la mayor parte de los Planetas Jovianos la integran compuestos gaseosos y helados, junto con átomos de hidrógeno y helio atrapados por la fuerte atracción gravitacional de estos protoplanetas. Es casi seguro que estos planetas de gran masa se formaron de modo parecido a cómo se formó nuestro Sol. Sin embargo, ninguno de ellos tiene la masa suficiente para provocar la combustión nuclear, característica que distingue a las estrellas.

En las regiones internas del Sistema Solar primitivo, la temperatura media debió ser de unos mil grados centígrados cuando comenzó la solidificación del gas. El ambiente era demasiado caliente para la supervivencia del helio. En su lugar, muchos de los elementos pesados más abundantes, como el silicio, el hierro, el magnesio, el aluminio —los metales pesados— se mezclaron con el oxígeno para producir óxidos de hierro, silicatos y diversos minerales de roca.

Estos granos de roca en rotación se fueron convirtiendo en objetos de tamaño progresivamente mayor, desde el de un guijarro al de una pelota de béisbol, más tarde de baloncesto, etcétera. Cuanto mayor era su tamaño, más rápidamente se producía su fusión, ayudada por la gravedad, con más y más materia de las regiones circundantes del disco nebuloso achatado, hasta que llegaron a ser objetos de tamaño planetario. El grueso del proceso de formación no requirió probablemente más de unos pocos millones de años. Esta aglomeración de los sólidos condensados explica la composición de los Planetas Terrestres. Los abundantísimos elementos ligeros de hidrógeno y helio, así como muchos otros gases que no pudieron solidificarse, escaparon seguramente de estos pequeños objetos protoplanetarios. La temperatura era demasiado elevada y la gravedad demasiado escasa para evitar la fuga de gases de los planetas internos. El poco hidrógeno y helio restante debió ser barrido por el viento y la radiación del recién formado Sol. Lo que quedó, según los modelos teóricos, fueron varios planetas rocosos, fríos, hostiles y casi desprovistos de atmósfera.

Continúa siendo un misterio por qué no se juntaron para formar un planeta las miríadas de rocas de la franja de asteroides entre Marte y Júpiter. Tal vez lo hicieran y formaran uno, que después explosionó por alguna razón hasta ahora desconocida.

El origen de la Luna es también incierto. En general, predominan tres teorías. Una de ellas sugiere que la Luna se condensó en un objeto aislado cerca de la Tierra, de un modo bastante parecido a como lo hizo nuestro planeta. Entonces los dos objetos formaron un sistema planetario binario, uno de cuyos planetas giraba en torno al otro. Aunque aceptada por muchos planetólogos, esta idea adolece de un defecto importante: la Luna tiene menor densidad y una composición diferente de la de la Tierra, por lo que resulta difícil comprender cómo pudieron formarse del mismo globo protoplanetario.

Una segunda teoría afirma que la Luna se condensó lejos de la Tierra, y más tarde fue capturada por ella. De este modo, la densidad y composición de los dos cuerpos no necesitan ser similares, ya que la Luna pudo materializarse en una región diferente del Sistema Solar primitivo. Pero aquí la objeción es que la captura de la Luna no habría sido un suceso trivial, y probablemente es imposible. ¿Por qué? Porque la masa de nuestra Luna en relación con la de la Tierra es mayor que la de cualquier otra luna de cualquier otro planeta. No se trata de que nuestra Luna sea el satélite natural de mayor tamaño del Sistema Solar, sino de que es insólitamente grande en comparación con su planeta materno, la Tierra. El modelo matemático sugiere que no es razonable esperar que la gravedad terrestre atrajera a la Luna en la forma exacta para capturarla durante un encuentro a poca distancia, en algún momento del pasado.

La tercera hipótesis estipula que la Luna tuvo su origen en la propia Tierra. La Cuenca del Pacífico ha sido mencionada a menudo como el lugar del que pudo ser arrancado el material protolunar, como resultado de fuerzas centrífugas en una Tierra joven y en rápida rotación. Por absurda que la idea pueda parecer, los primeros descubrimientos del Programa Apolo parecieron corroborarla. Se comprobó que tanto la composición como la densidad de la Luna eran iguales que las del manto terrestre, la región situada justo debajo de la corteza. Pero estudios recientes, más concienzudos, de la composición de nuestra Luna revelan importantes disimilitudes con el manto terrestre. Además, subsiste el misterio fundamental de cómo pudo expeler la Tierra un objeto tan grande como nuestra Luna.

Resulta evidente que ninguna de estas teorías es satisfactoria. Sin embargo, una de ellas o alguna versión de ellas debería ser la correcta. Por desgracia, las muestras de material lunar recogidas durante las misiones norteamericana y soviética no han podido dirimir una de las cuestiones más antiguas de la humanidad. Quizá la formación de nuestra Luna fue producto de circunstancias tan insólitas que nunca podremos averiguar los pormenores de su nacimiento. De hecho, el origen de la Luna terrestre es un tema frustrante... y tan desorientador que algunos investigadores se han visto obligados a sugerir, llenos de exasperación, que la Luna no existe.

En cualquier caso, actualmente la mayoría está de acuerdo en que la génesis de un sistema planetario como el nuestro es consecuencia natural, y acaso frecuente del nacimiento de una estrella. Sin embargo, uno de los grandes problemas científicos que aún no tienen solución es saber con exactitud cómo lograron los pequeños átomos y granos de polvo juntarse para crear los planetas y satélites que ahora contemplamos. Nuestra igno-

rancia se debe a que no podemos probar experimentalmente la crónica geológica de los primeros quinientos millones de años de la historia terrestre. Falta material de este crítico período de tiempo, que seguramente nos facilitaría claves del medio ambiente en que nació nuestro planeta; un material literalmente fundido y erosionado por el tiempo. El único modo de recuperar estas claves de lo ocurrido aquí hace aproximadamente cinco mil millones de años es consagrarse a un activo programa de exploración de todo nuestro Sistema Solar.

Merece la pena hacer otra observación antes de terminar nuestros comentarios sobre los planetas. La hipótesis dominante sobre el origen del Sistema Solar sostiene que los hechos que lo produjeron no son en absoluto únicos. Se supone que muchas estrellas tienen alguna clase de sistema planetario. Aunque sólo un uno por ciento de todas las estrellas de la Galaxia tuviera sistemas planetarios, habría miles de millones de estrellas con planetas. Y probablemente cada estrella sería orbitada por más de un planeta, claro está.

La teoría es una cosa, y la observación es otra. ¿Existe alguna evidencia experimental de que haya planetas orbitando a otras estrellas? Por desgracia, la respuesta es actualmente ambigua. Desde luego no existen pruebas de que algún planeta como la Tierra esté orbitando a otra estrella. La luz reflejada por cualquier planeta que orbitara incluso a una de las estrellas más próximas sería demasiado débil para ser detectada por los mejores instrumentos empleados hoy día por los astrónomos. Es posible que en la década de los años ochenta, cuando se lancen en órbita sobre la borrosa atmósfera terrestre grandes telescopios ópticos, los astrónomos sean capaces de detectar algunos planetas de tamaño joviano que orbiten a estrellas cercanas a nuestro Sistema Solar. Pero incluso en este caso, estas estrellas se encontrarían en el umbral de la visibilidad, y los experimentos podrían no dar resultados fructíferos. Las imágenes de los planetas que orbiten esos lejanos puntos de luz del firmamento nocturno serán minúsculas, pálidas y desorientadoras.

Hay dos tipos de pruebas *indirectas* de que quizá algunos planetas giren en torno a varias de las estrellas con poca masa más próximas a nosotros. La primera se refiere al hecho de que las estrellas de gran masa suelen girar mucho más deprisa que sus colegas de menor tamaño. Las estrellas cuya masa sea menor del doble de la de nuestro Sol tienen mucho menos momento rotacional de lo esperado. Como el Sol, la mayoría de estrellas de poca masa parecen haber perdido gran parte de su ímpetu original. Su momento puede encontrarse en cambio en la rotación de los planetas de su órbita. Después de todo, los planetas de nuestro Sistema Solar poseen la mayor parte de su momento angular, y este hecho obliga a especular sobre la posibilidad de que las estrellas de poca masa tengan también planetas.

La segunda prueba indirecta de la existencia de planetas cerca de otras estrellas se deriva de la pequeña influencia gravitacional que los planetas ejercen sobre las estrellas. Un gran planeta que orbite a una estrella de poca masa debería producir una ligera alteración en el movimiento de dicha estrella. Incluso aunque el planeta no pueda ser visto, este objeto invisible atrae gravitacionalmente en una dirección y luego en otra durante su órbita anual, y el resultado es un ligero cambio o fluctuación en la trayectoria de la estrella. Hay informes recientes sobre esta clase de fluctuación en algunas estrellas, pero es extraordinariamente difícil hacer mediciones que ofrezcan algún grado de certeza.

Parece justo decir que los astrónomos no tienen por el momento ninguna prueba directa de la existencia de planetas asociados con cualquier otra estrella. Que sólo tienen probables pruebas indirectas. Y que nosotros sepamos, el Universo podría rebosar de planetas rocosos y helados o incluso de objetos del tamaño de una pelota de baloncesto cerca o lejos de cualquier estrella. Nuestra civilización no ha inventado todavía los instrumentos necesarios para hacer un inventario de los cuerpos pequeños, compactos y oscuros que residen en el espacio cercano.

Sólo tenemos la idea de que si los planetas se crean como consecuencia natural de la formación estelar, el espacio debe estar infestado de ellos, del mismo modo que rebosa de estrellas en nuestra Galaxia, y en las galaxias situadas más allá de la Vía Láctea. Pero sólo es una conjetura, porque no tenemos la certeza absoluta.

Nuestro Sistema Solar alberga una gran variedad de cuerpos: planetas, satélites, asteroides, cometas y meteoritos son habitantes bien conocidos (aunque no todavía bien comprendidos) de nuestra minúscula hornacina en la periferia de la Vía Láctea. El amplio espectro de propiedades físicas y químicas existente entre los planetas peculiares y sus satélites parece indicar que nuestro Sistema Solar está lleno de escombros, de restos muy diseminados de una era más violenta —aunque al mismo tiempo más formativa— de la historia de nuestro ambiente local. ¿Podremos identificar algún día todas las piezas y comprender el rompecabezas completo? En nuestra opinión, la respuesta es afirmativa.

Cada vez que se hace un nuevo descubrimiento, aprendemos algo más sobre las propiedades generales de los planetas. Las sondas espaciales interplanetarias de la última década han hecho progresos extraordinarios que nos han obligado en algunos casos a revisar totalmente nuestra idea de ciertos cuerpos astronómicos. Hoy día es evidente que cada planeta contribuye a la apreciación global de un ciclo de vida planetaria, del mismo modo que las diferentes estrellas aumentan nuestra comprensión del ciclo de vida estelar. Cada uno ofrece algo sobre el origen del sistema, así como sobre su evolución.

Casi cada planeta o satélite se halla ahora en una fase evolutiva diferente, del mismo modo que las gigantes rojas y las enanas blancas representan diversas fases de la evolución estelar. Los Planetas Jovianos parecen fragmentos interestelares congelados en el tiempo, y estar dotados de masa demasiado reducida para convertirse en estrellas, y sin embargo, demasiado grande para transformarse en enormes rocas. Han conservado en diversos grados las propiedades originales del Sistema Solar primitivo. En cambio los Planetas Terrestres, de masa menos abundante, han evolucionado mucho, produciendo superficies duras y purificando de gas las atmósferas y a veces los océanos. Y sobre todo, por lo menos uno de estos pequeños planetas ha generado vida.

Al parecer, cada planeta ha evolucionado de acuerdo con su masa. Ésta juega indudablemente un papel crucial en la evolución de todos los tipos de materia, incluyendo galaxias, estrellas, planetas y vida. Es posible que sea el factor evolutivo único más importante del Universo.

No contemplemos, pues, el Sistema Solar como una colección de escombros planetarios. Cada planeta tiene algo que decirnos. Cada vez que una nueva sonda espacial reconoce un planeta — y algunas sondas están en camino ahora mismo —, aprendemos un poco más sobre él. Aprendemos en particular cómo encaja el planeta en el esquema general del Sistema Solar.

La síntesis de todos los estudios planetarios nos ofrecerá algún día nada menos que la revelación total del origen, la evolución y el destino de nuestro diminuto hogar dentro de este vasto Universo.

ÉPOCA QUINTA

LA VIDA

MATERIA MÁS ENERGÍA



A antiguas supernovas les debemos, no sólo la existencia de nuestro planeta, sino también la nuestra, porque también nosotros estamos hechos de elementos pesados. Muchas estrellas han muerto para que nosotros pudiéramos vivir.

Casi todo lo que hay en la Tierra está compuesto de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. Los azulados océanos de agua líquida constan en parte de un elemento pesado, porque al fin y al cabo el agua no contiene sólo dos partes de hidrógeno, sino también una parte de oxígeno. Solamente una combinación fortuita de temperatura y presión, diferente de la de cualquier otro planeta conocido, permite que grandes cantidades de agua, la suficiente para cubrir las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta, permanezcan en estado líquido.

El aire también está hecho de elementos pesados. La atmósfera se compone principalmente de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua, y está constantemente expuesta a los cambios meteorologicos, causa de las variables capas de nubes que, visto desde lejos, predominan en nuestro planeta.

Y también se encuentran elementos pesados en las pardogrisáceas regiones formadas por tierra y rocas.

La superficie terrestre sólida — pese a su apariencia inmutable e inmóvil vista desde el espacio exterior, o incluso desde aquí, bajo nuestros pies — la forman placas ricas en sílice que se trasladan de una parte de nuestro globo a otra deslizándose a un ritmo tan lento, que resulta imperceptible a simple vista.

La conjunción de elementos pesados más notable de la Tierra es la vida. Plantas y animales pululan por doquier, tanto en la tierra como en el mar, aunque no es fácil detectar pruebas de esta vida desde el espacio. Es de interés particular saber que estos conjuntos de elementos pesados conocidos como hombres y mujeres no han existido hasta la última décima parte del último uno por ciento de la historia terrestre.

Ahora parece que la vida está biológicamente adaptada al planeta, pero la adaptación es un esfuerzo que no tiene fin. El cambio es inevitable. Nada permanece inmutable, nada en absoluto. Incluso los aspectos más sólidos de la Tierra se transforman, evolucionando a una escala de tiempo casi incomprensible si se compara con la duración de la vida humana. Es difícil creer lo que no se ve. ¡Pero vemos tan pocas cosas en el tiempo...! Incluso la duración de nuestra civilización es un mero parpadeo en el espectáculo del cambio cósmico.

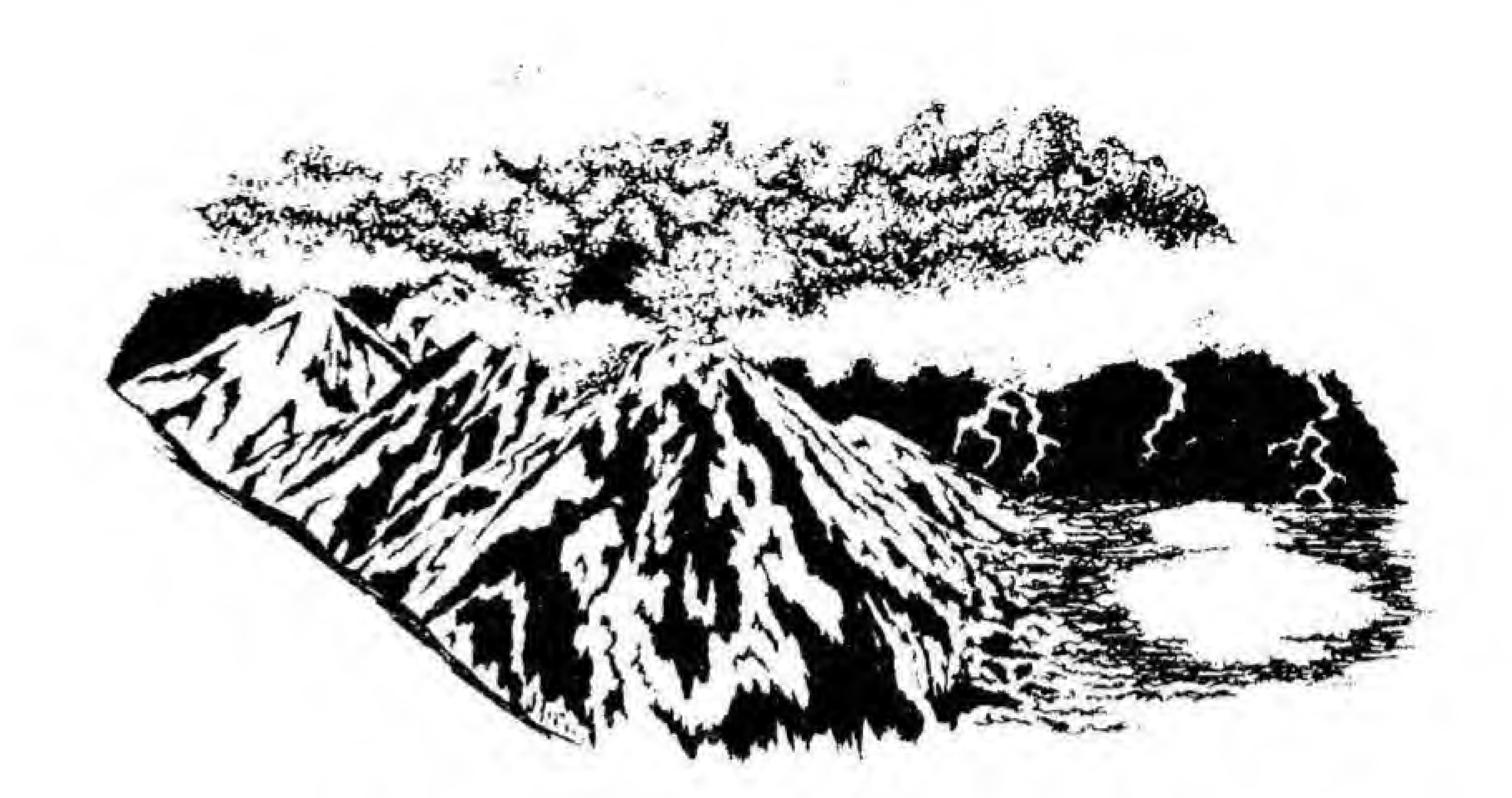
El cambio efectivo suele ser un cambio sutil. En realidad, si las alteraciones en el ambiente geológico, químico, termal o político fueran muy bruscas podrían hacer inhabitable nuestro planeta Tierra.

Imaginemos las condiciones imperantes en la Tierra hace varios miles de millones de años. La Tierra primitiva y su medio ambiente diferían de modo espectacular del mundo que ahora habitamos en casi todos los aspectos.

La atmósfera original de la Tierra contenía casi con seguridad todos los elementos más abundantes — hidrógeno, helio, nitrógeno, oxígeno, neón, carbono —, así como una larga lista de microelementos. Estos gases reflejan los de la nube interestelar de la que se formó nuestro Sistema Solar. Pero esta atmósfera primitiva no duró mucho tiempo. La superficie terrestre era mucho más caliente que ahora durante sus primeros mil millones de años, y muchos de los gases atmosféricos que prevalecían entonces debieron evaporarse hacia el espacio exterior. La gravedad no pudo retener a los primitivos gases calientes.

Pese a la pérdida de la atmósfera original de la Tierra, es obvio que otra atmósfera rodea actualmente nuestro planeta. No estaríamos aquí si así no fuera. De ahí que el aire que ahora respiramos debe ser una atmósfera secundaria adquirida por nuestro planeta en una fecha posterior.

Por la misma razón por la que los cubos de hielo se congelan desde fuera hacia dentro, la superficie de la Tierra primaria, que se enfriaba paulatinamente, debió ser la primera parte del planeta fundido que se solidificara en roca, mientras el calor intenso quedaba atrapado bajo la corteza. El resultado fueron seguramente volcanes, géiseres, terremotos y otros diversos sucesos geológicos que vomitaron literalmente el vapor y calor aprisionados a través de las grietas de la superficie. Esta eliminación de gas ocurre todavía en la actualidad, aunque sólo en algunos puntos de la Tierra y con muy poca frecuencia. Pero hace varios miles de millones de años, este tipo de actividad geológica debió ser mucho más frecuente y extendida. La observación de los volcanes modernos revela que fueron arrojadas al exterior grandes cantidades de vapor de agua, anhídrido carbónico y nitrógeno, junto con cantidades aún mayores de ceniza y polvo, además de hidrógeno, oxígeno, carbono y otros gases. De este modo, una nueva atmósfera fue exhalada por las fisuras de nuestro inquieto planeta.



Esta segunda atmósfera se estabilizó gradualmente. A medida que la Tierra primitiva se enfriaba, los gases atmosféricos no eran impelidos con tanta fuerza por el calor que antes provocaba su fuga hacia el espacio. El nitrógeno liberado por los gases permaneció en la atmósfera, de la que ahora constituye la mayor parte. El vapor de agua se transformó en agua líquida, formando lentamente los océanos. Y el bióxido de carbono reaccionó con las rocas de silicato en presencia del agua y se formó la piedra caliza. El gas de oxígeno puro que pudiera existir en la Tierra primitiva desapareció rápidamente al reaccionar, ya con hidrógeno para formar más agua, ya con minerales de la superficie para formar óxidos como el orín y la arena que ahora se encuentran en toda la corteza de nuestro planeta. El oxígeno respirable y la protectora capa de ozono surgieron mucho más tarde, después de que las plantas se extendieran sobre la faz de la Tierra.

Resguardadas por la atmósfera secundaria de la Tierra, algunas de las sustancias químicas que los gases precipitaron pudieron interaccionar entre sí. No era precisa la coacción de influencias exteriores para que los gases primitivos colisionaran, se juntaran y reaccionaran para formar los gases ligeramente más complejos de amoníaco y metano. Los químicos de laboratorio verifican estas reacciones casi a diario en el curso de sus trabajos industriales y académicos. Y los teóricos comprenden muy bien las fuerzas electromagnéticas de los electrones que impelen a estos sencillos átomos atmosféricos a juntarse, produciendo con ello moléculas gaseosas estables.

Con el tiempo, los productos moleculares de estas reacciones espontáneas se convirtieron en protagonistas de otras reacciones químicas. Pero estas reacciones químicas adicionales ya no fueron espontáneas. Experimentos de laboratorio demuestran que las moléculas simples de amoníaco, metano y vapor de agua requieren algo de energía para seguir mezclándose. Esta energía es, en cierto sentido, un catalizador en la producción de moléculas aún mayores. En realidad, es más que un catalizador. La aplicación de energía obra casi un milagro: sintetiza moléculas mucho más complejas que las que se formarían por azar en un conjunto de átomos libres y moléculas simples. Hay que asombrarse: las moléculas producidas son los ladrillos de la vida.

La vida puede parecer biológica, social y culturalmente compleja, pero física y químicamente es bastante sencilla. Dividida en sus partes componentes, los ingredientes básicos de la vida —cualquier vida, desde bacterias a avestruces— no son más que dos docenas de moléculas de complejidad moderada. Así pues, para comprender las propiedades básicas de la vida no es necesario examinar un organismo tan complejo como el cuerpo humano en su totalidad; la naturaleza molecular de la vida contemporánea es suficiente.

Todos los organismos vivos están compuestos de células, la forma más sencilla de conglomeración material que tiene los atributos comunes de la vida: nacimiento, metabolismo y muerte. Desde los organismos más sencillos a los humanos más inteligentes, la unidad básica es la célula. Para apreciar la evolución química —los cambios ocurridos entre átomos y moléculas a fin de producir vida—, basta con considerar la construcción de la primera célula.

Las células son pequeñas, aproximadamente una millonésima parte de un milímetro, y por consiguiente invisibles a simple vista. El microscopio nos revela que el núcleo central es la parte más compleja de una célula. Estos núcleos biológicos, que contienen billones y billones de átomos y moléculas, no deben confundirse con los núcleos atómicos, más pequeños, producidos directamente en los corazones de las estrellas. El núcleo biológico de modo parecido a la yema del huevo, está rodeado de un citoplasma espeso y fluido de menor complejidad. Toda la forma de vida unicelular está contenida en una membrana semipermeable a través de la cual átomos y moléculas pueden entrar y salir.

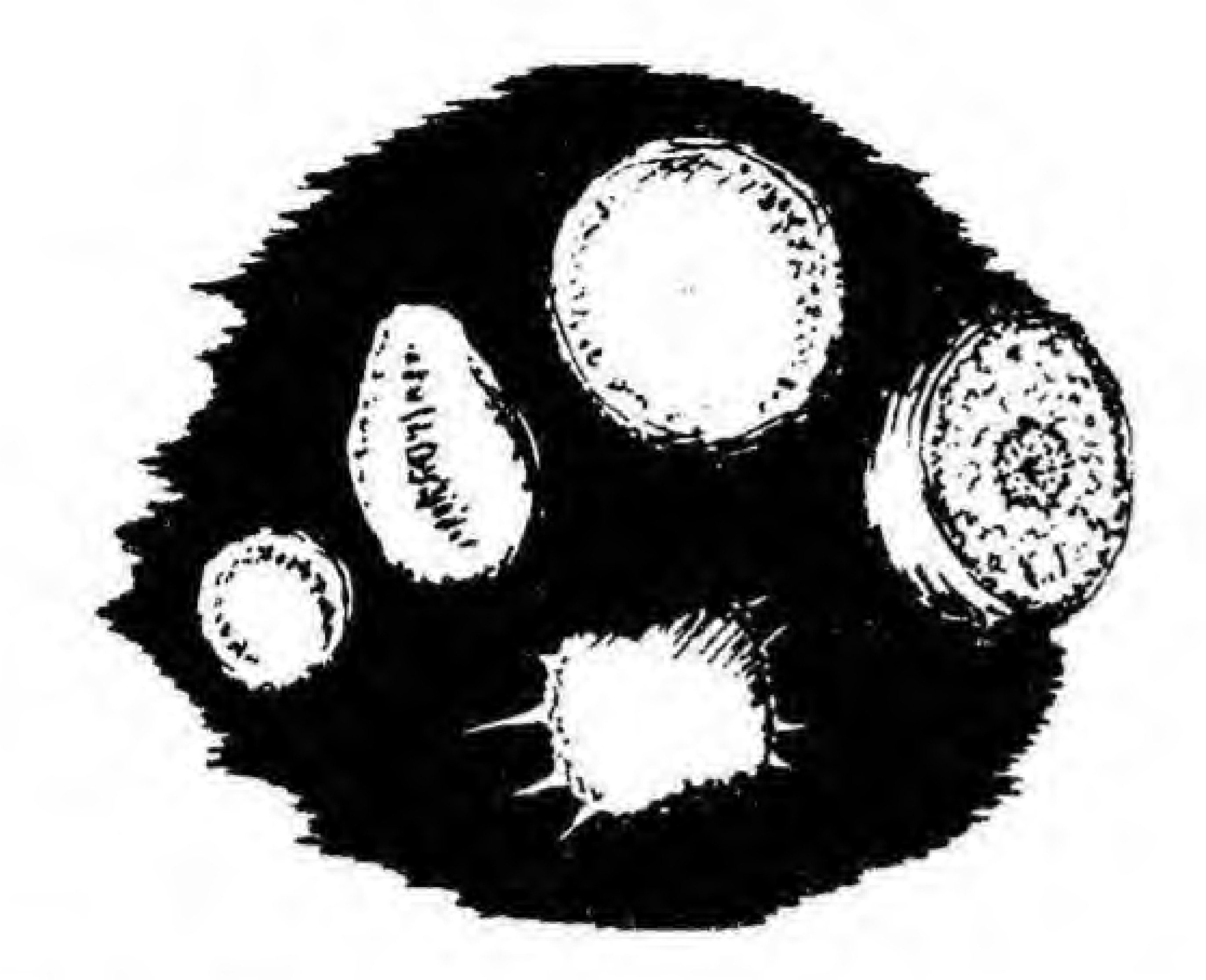
Así pues, las células son las formas de vida más sencillas. Sin embargo, son muchísimo más complejas que las formas más sencillas de materia: las partículas elementales que contienen los átomos.

El organismo vivo más sencillo, la ameba, es unicelular. Los organismos más avanzados suelen contener ingentes cúmulos de células. Un hombre adulto, por ejemplo, alberga casi cien billones de células microscópicas. Su densidad en todo el cuerpo humano alcanza una media de más de cien millones de células por centímetro cúbico. Además, cada una de estas células contiene grandes cantidades —billones o más— de átomos y moléculas. Por consiguiente, la densidad de la materia básica en las formas de vida avanzadas es de una increíble magnitud.

Con el tiempo, incluso a cada segundo, muchas células son destruidas como resultado del proceso normal de envejecimiento y muerte. Sin embargo, todos los organismos vivos son capaces de mantener un tamaño y aspecto razonablemente constantes a través de toda la madurez, ya que, mientras mueren algunas células, otras se están formando. Nuestros cuerpos, y los cuerpos de todos los demás seres vivos, fabrican continuamente más núcleos celulares, citoplasma y membranas para mantenerse vivos, y lo hacen por medio de una curiosa interacción entre los dos bloques básicos de la vida.

Los ingredientes más importantes del citoplasma son las proteínas, porque contienen la base de cualquier organismo vivo. La palabra «proteína» se deriva del griego y significa «de primordial importancia». No es el nombre de una sustancia en particular, sino más bien un término para definir toda una clase de moléculas biológicas complejas. Sólo en el cuerpo humano hay decenas de miles de diferentes proteínas, que constituyen el grueso de los intestinos, piel, huesos, cabellos y músculos, así como de todas las demás partes de nuestro cuerpo.

Las proteínas contienen grandes cantidades del elemento carbono. De hecho, el cincuenta por ciento del peso de nuestro cuer-



po es carbono. Semejantes sustancias «orgánicas» contrastan fuertemente con cosas inertes tales como monedas, losas de cemento o granos de sal. Esas materias son «inorgánicas» porque están casi exclusivamente compuestas de minerales. No contienen proteínas y su contenido en carbono no suele sobrepasar la décima parte del uno por ciento de su peso total.

Así pues, el carbono desempeña un papel importante en los organismos vivos; es vital en la construcción de proteínas.

¿De qué se componen las proteínas? Aparte de su contenido en carbono, ¿existe un denominador común entre las miríadas de diferentes proteínas halladas en el amplio espectro de células de la vida contemporánea? La respuesta es afirmativa, porque los experimentos han demostrado que un grupo bastante pequeño de moléculas fabrica todas las proteínas. Estas moléculas básicas, llamadas aminoácidos, son acidógenas (reactivas) en solución y suelen contener amoníaco. Sólo hay veinte de estas unidades estructurales, y juntas comprenden todas las proteínas de la vida terrestre; no sólo de la humana, sino de todas las clases de vida. Los aminoácidos son uno de los dos bloques básicos de la vida.

No se trata de sustancias muy complejas. La más sencilla, la glicina, es una combinación molecular de cinco átomos de hidrógeno, dos de carbono, dos de oxígeno y uno de nitrógeno. Cada uno de estos átomos se mantiene unido a los otros en virtud de las fuerzas de atracción electromagnéticas, llamadas también enlaces químicos. El aminoácido más complejo es el triptófano, compuesto de doce hidrógenos, once carbonos, dos oxígenos y dos nitrógenos.

En principio, la proteína más sencilla posible debería ser teóricamente la combinación de dos aminoácidos de glicina. Puede

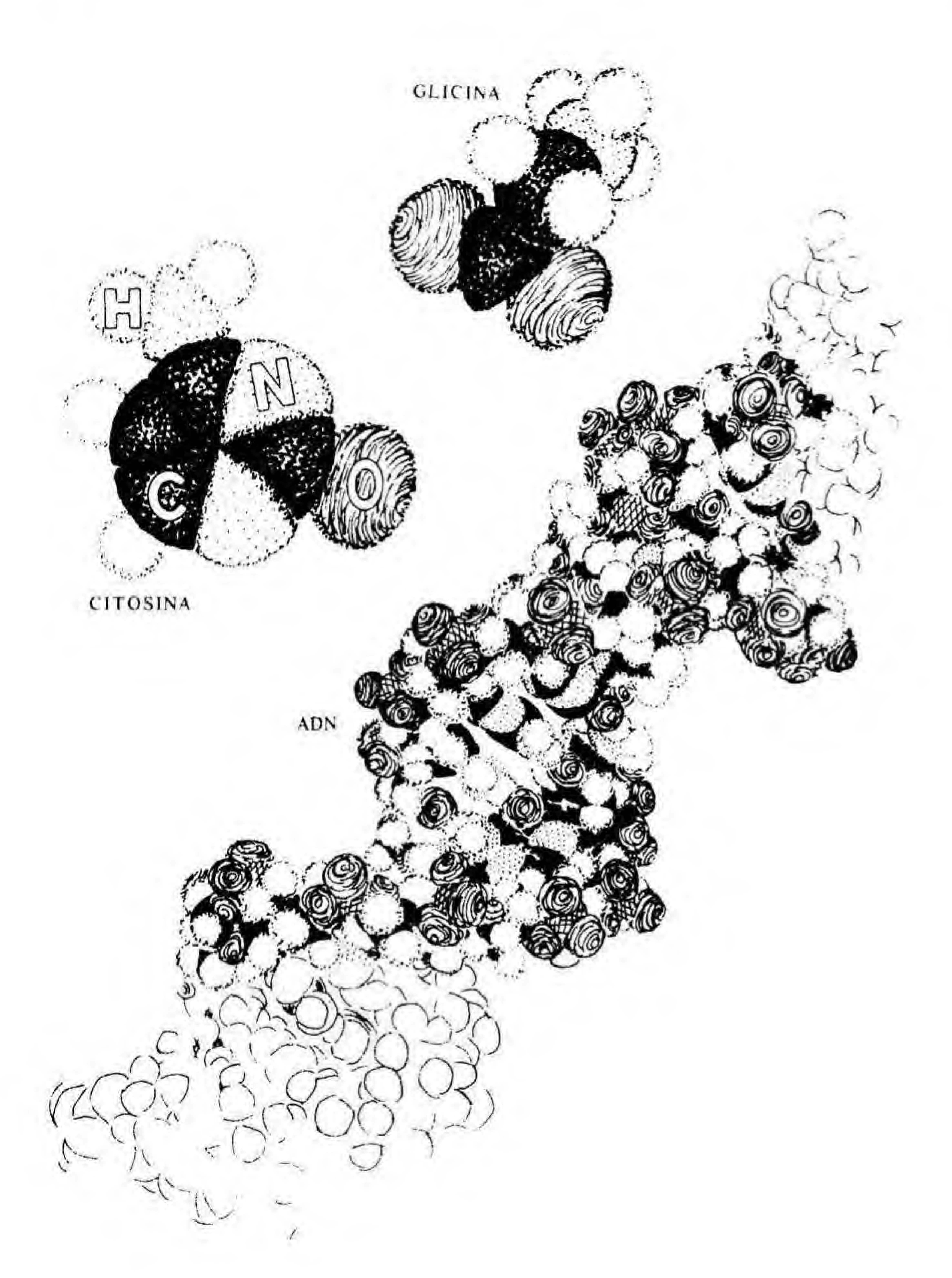
lograrse un enlace electromagnético siempre que se retire un átomo de hidrógeno de una glicina, e hidrógeno oxigenado de la otra, lo cual equivale a una extracción de agua y garantiza un fuerte enlace químico entre las dos glicinas.

En la práctica, la vida es un poco más compleja, porque los bioquímicos no conocen ninguna proteína real tan sencilla como ésta. Una de las proteínas más sencillas que se conocen es la insulina, que contiene cincuenta y un aminoácidos enlazados como perlas de un collar. Otra proteína muy conocida es la hemoglobina, principal componente de las células de la sangre humana. Contiene casi seiscientos aminoácidos, e incorpora en su estructura diecinueve de los veinte tipos diferentes, por lo que sólo le falta uno.

La función bioquímica de la hemoglobina (y de todas las demás proteínas) es altamente específica y pone de relieve una importante faceta de la estructura proteínica. Las transfusiones sanguíneas nos enseñan que la sangre de un tipo no puede sustituir a la de otro tipo. Las diferencias entre los diversos tipos de sangre son resultado de la ordenación de los aminoácidos. Así, el comportamiento físico y químico de una proteína —que es una larga acumulación en cadena de aminoácidos— no sólo depende del número de ácidos sino también de la ordenación de los ácidos integrados en dicha proteína.

En un sentido más amplio, las proteínas imprimen cierto carácter a las células, y éstas a su vez al entero organismo vivo. El carácter fundamental de la vida depende en última instancia del número y la ordenación de los aminoácidos. Este número y esta ordenación es lo único que distingue al hombre del ratón, demostrando que la naturaleza de la propia vida no es del todo incomprensible, por lo menos a nivel microscópico.

Una vez conscientes de la estructura molecular de las proteínas, volvamos a la cuestión original: ¿Cómo se crean las proteínas en los organismos vivos para que mantengan la integridad de dichos organismos? En concreto, ¿qué proceso bioquímico sirve para enlazar a los aminoácidos durante toda la vida a fin de que puedan abastecer al citoplasma muerto? Cualquiera que sea el proceso, tiene que ser importante, ya que la fabricación de proteína es absolutamente vital para el bienestar del organismo; no cualquier proteína, sino exactamente el tipo adecuado, que tenga los aminoácidos dispuestos exactamente en el orden adecuado. Con objeto de apreciar la secuencia de construcción proteínica, nos referiremos a los ácidos nucleicos, otro ingrediente básico de la vida.



Los ácidos nucleicos, como las proteínas, son largas formaciones en cadena de moléculas ricas en carbono. Su nombre se debe al hecho de que estos ácidos fueron descubiertos en los núcleos biológicos de las células. Aunque conocemos una gran variedad de ellos, los ácidos nucleicos, como las proteínas, sólo tienen un reducido número de componentes básicos. Llamados bases nucleótidas, constituyen el segundo grupo de bloques básicos de la vida. Podemos comprender el papel bioquímico de estas bases considerando el más famoso de todos los ácidos nucleicos: el desoxirribonucleico, alias ADN.

Las moléculas del ADN están hechas de cuatro bases fundamentales: adenina, citosina, guanina y timina. Existe un quinto nucleótido llamado uracil, que se usa en la construcción de otros ácidos nucleicos, aunque no en el ADN. Estas cinco bases desempeñan la misma función para los ácidos nucleicos que la desempeñada por los veinte aminoácidos para las proteínas. Ninguna de las bases nucleótidas es mucho más compleja que los aminoácidos, dado que son también agrupaciones moleculares de átomos de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno.

Aunque muchos consideran al ADN una molécula muy compleja, en realidad no es más que una cadena de los cuatro tipos de bases, que forman los «escalones» de una larga y delgada combinación semejante a una escalera retorcida. Cada escalón de una molécula del ADN consta de dos bases unidas entre sí que prestan a este ácido nucleico su famosa estructura de doble hélice. Sin embargo, las pruebas experimentales demuestran que las cuatro bases no se unen entre sí de cualquier modo. La citosina se une siempre con la guanina, formando una de las dos parejas de bases posibles, mientras la adenina se une sólo con la timina, fabricando la otra pareja. La estructura de las moléculas y en especial sus fuerzas electromagnéticas hacen incompatible cualquier otra combinación.

El ADN es sólo uno de muchos ácidos nucleicos, pero destaca del resto a causa de una extraordinaria capacidad: puede duplicarse, hacer una réplica de sí mismo. Una molécula del ADN puede escindirse en dos mitades, partiéndose cada travesaño en dos; entonces las bases nucleótidas que flotan libremente en el núcleo de la célula pueden unirse con cada uno de los elementos que han quedado sueltos. El resultado son dos moléculas de ADN donde antes sólo había una. El hecho de que la citosina sólo pueda unirse con la guanina, y la adenina sólo con la timina asegura que las dos copias sean idénticas a la molécula original. Las moléculas recién unidas se separan seguidamente para retirarse a lados opuestos del núcleo celular, tras lo cual la célula se divide en dos, cada una de las cuales alberga un grupo completo de moléculas de ADN.

La conservación de la estructura exacta de la molécula original del ADN es la característica más importante de la duplicación. Toda la información sobre las funciones específicas de este tipo de célula —ya sea de la sangre, del cabello, de los músculos, etcétera— pasa de una célula vieja a una recién creada. Por consiguiente, la función biológica de la célula «hija» sigue siendo idéntica a la de la célula «madre». De este modo, las moléculas del ADN, a menudo llamadas genes, son responsables de dirigir esta herencia de generación en generación.

Como en el caso de las secuencias de aminoácidos en las proteínas, la ordenación de las bases nucleótidas, así como su número, es primordial en la construcción de los ácidos nucleicos. La secuencia de las bases en una molécula de ácido nucleico especifica el comportamiento físico y químico de este gene en particular. El conjunto de los genes de un organismo vivo forman un código genético, una compilación enciclopédica de las propiedades físicas y químicas de todas las células y todas sus funciones. En un sentido muy real, la estructura y el comportamiento de los organismos vivos obedecen a los dictados de las moléculas de ácido nucleico que hay en el núcleo de las células, porque son las estructuras materiales pasadas de una generación de células a la generación siguiente.

Si las comparamos con otro tipo de información almacenada —este libro, por ejemplo—, las bases individuales pueden considerarse palabras, las parejas de bases, frases, y una molécula de ADN completa, un libro de instrucciones. Las palabras y frases tienen que guardar un orden para dar significado al libro. Una biblioteca entera de semejantes libros de instrucciones constituye, pues, el código genético para todas las variadas funciones realizadas por un organismo vivo. En resumen, un grupo completo de moléculas de ADN es realmente información, un programa de acción detallado, un plan maestro para todas las formas de vida.

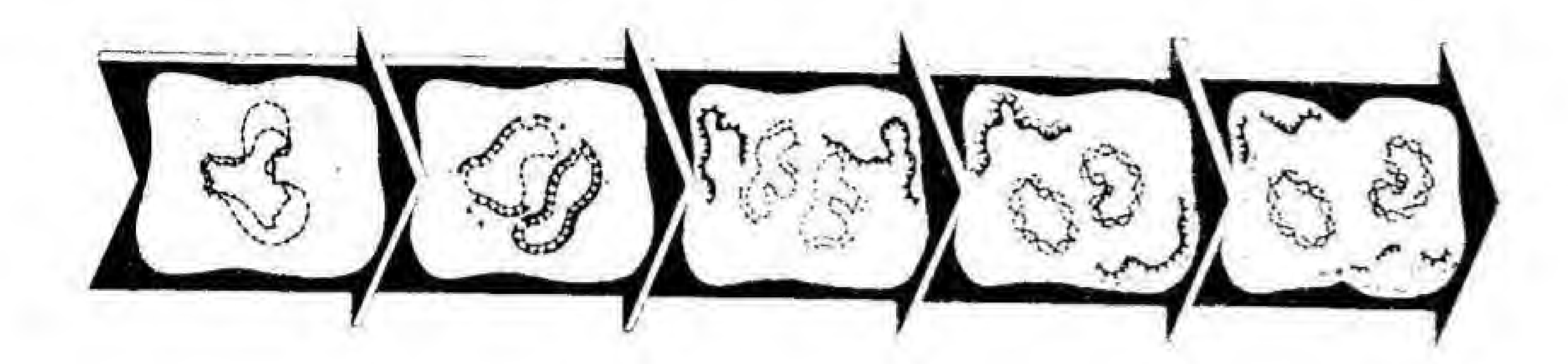
La naturaleza de todos los seres vivos viene determinada en última instancia por la estructura de las moléculas del ADN contenidas en ellos. Esta estructura no sólo dicta las diferencias entre los tipos de organismos en organización y personalidad, sino también la coordinación adecuada de los acontecimientos físicos y químicos del interior de las células para que la actividad de éstas sea la que debe ser. A primera vista parece imposible que una molécula pueda hacer todo esto. Pero la molécula de ADN es la de mayor tamaño entre todas las conocidas. En organismos avanzados como el humano, la molécula del ADN, aunque limitada a cuatro tipos de bases, puede llegar a tener cien millones de bases o diez mil millones de átomos, que prestan a la molécula una longitud de casi un metro, medida de punta a punta. En la analogía formulada más arriba, en que una base del ADN equivale a una palabra, una sola molécula del ADN equivaldría a un manuscrito de cien páginas. Cantidades ingentes de posibles combinaciones de bases garantizan un vasto número de seres vivos diferentes, cada uno con distinto aspecto, estilo y personalidad. Sin embargo, a nivel microscópico, todos los seres sin excepción están compuestos de los mismos aminoácidos y nucleótidos, que son los bloques básicos de la vida tal como la conocemos.

Esta estructura molecular común a todas las manifestaciones de vida terrestre es la mejor prueba de que todos los seres vivos proceden de un antepasado unicelular aparecido hace miles de millones de años.

La producción continua de proteínas del citoplasma depende en gran parte de los ácidos nucleicos de la célula. La secuencia de los hechos es más o menos el siguiente: Justo antes de la división celular, la molécula del ADN envía a una molécula del mismo tipo, llamada ARN, desde el núcleo biológico al citoplasma. ARN representa al ácido ribonucleico, una versión menor (y con un solo larguero) del ADN (que normalmente consta de dos largueros).

La molécula del ARN actúa como un mensajero, llevando instrucciones de la molécula del ADN. Una vez en citoplasma, la ARN atrae hacia sus bases (travesaños) no enlazadas a los aminoácidos que flotan libremente. Sólo ciertos aminoácidos consiguen unirse a las bases del ARN, porque las fuerzas electromagnéticas de estas bases atraen a determinados aminoácidos y repelen a los demás. Después de cierto tiempo —del orden de unos microsegundos—, la molécula del ARN logra hacerse, mediante colisiones accidentales, con todo un complemento de aminoácidos (con otro larguero). Los ácidos de este nuevo larguero se unen entre sí en virtud de sus propias fuerzas electromagnéticas. Y por último, cuando la larga cadena de aminoácidos está dispuesta a lo largo de la molécula mensajera del ARN (cuando se ha completado el nuevo larguero de la escalera), esta nueva cadena se aleja dentro del citoplasma de la célula. De este modo se ha formado una proteína. Pero no se trata de una proteína corriente que haya sido creada al azar, sino de una proteína específica construida según las instrucciones dadas por la molécula del ARN. Así pues, el ARN actúa de receta o prescripción para la construcción de moléculas proteínicas... una receta que se origina en el núcleo de la célula con la propia molécula del ADN.

Así se efectúa el continuo abastecimiento de proteínas en los organismos vivos; todos ellos crecen y se estabilizan biológica-



mente de la misma manera. Este proceso se está desarrollando ahora mismo en nuestros cuerpos. Como es natural, diferentes organismos tienen diferentes estructuras del ADN y por lo tanto fabrican diferentes tipos de proteínas. De hecho, no hay dos organismos vivos con la misma estructura del ADN, excepto los mellizos monovitelinos.

Tanto en el hombre como en el ratón o como en la margarita, los ácidos nucleicos dirigen la vida y las proteínas mantienen su bienestar.

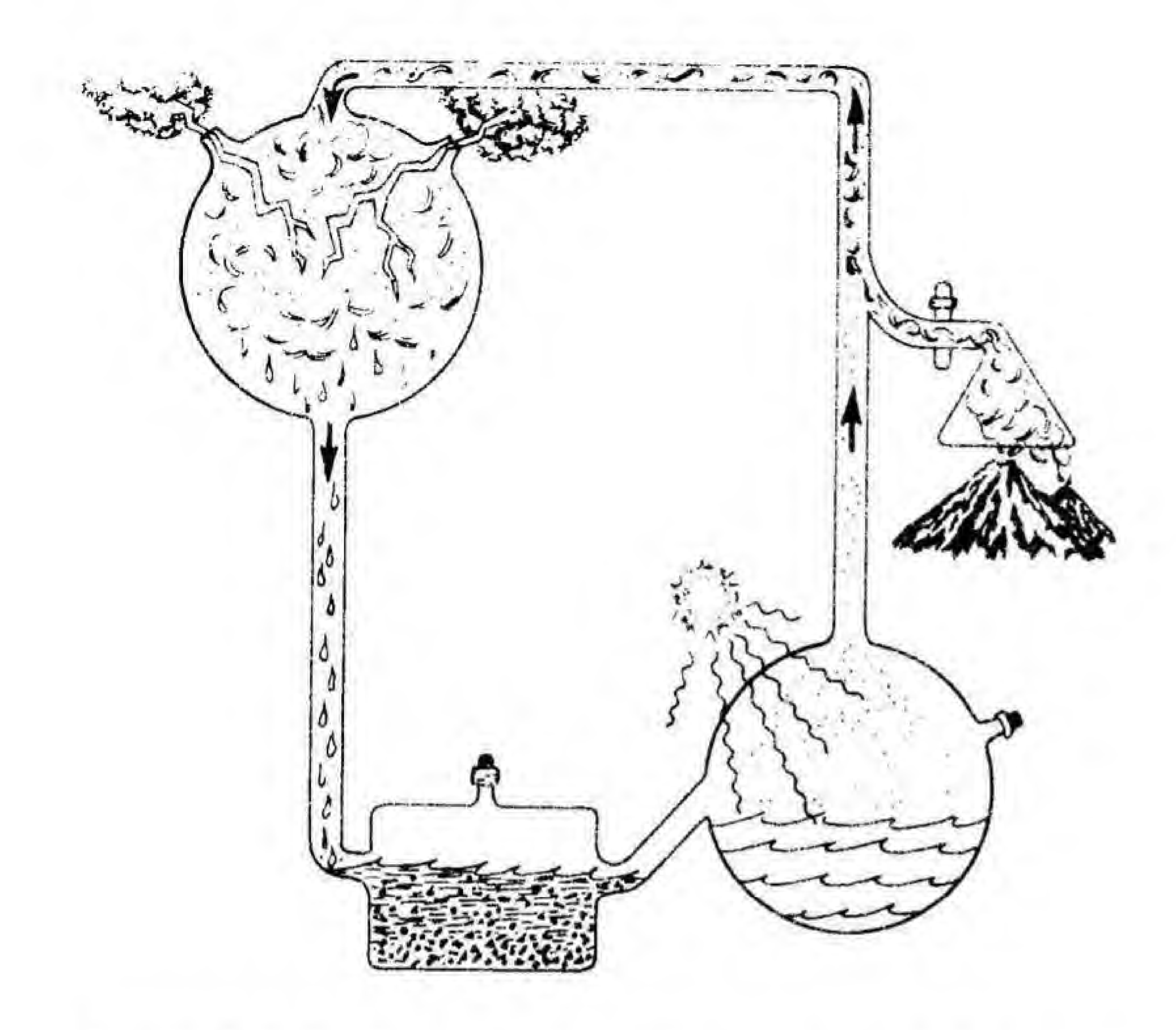
Comprender la vida contemporánea es una cosa, pero entender cómo pudo surgir de materia inorgánica es otra muy distinta. ¿Podemos estar seguros de que los ingredientes básicos para la vida estaban presentes en la Tierra primitiva? Y otra pregunta: ¿Podemos probar que estos bloques inorgánicos formaron una simple célula viva en las hostiles condiciones reinantes en nuestro planeta hace miles de millones de años? Estas preguntas sólo pueden formularse en el laboratorio, porque la atmósfera y la superficie de la Tierra actual difieren enormemente de las de la Tierra primitiva. Los resultados de modernos experimentos de laboratorio que imitan el ambiente geofísico del amanecer terrestre indican que la respuesta a estas preguntas es afirmativa.

Utilizando un gran recipiente parecido a un tubo de ensayo que contenga agua y diversos gases, es posible realizar un experimento bastante sencillo para simular los primitivos océano y atmósfera de la Tierra. El gas —generalmente una mezcla de amoníaco, metano, hidrógeno y, a veces, anhídrido carbónico— pretende reproducir la composición de la atmósfera secundaria. Aunque tóxico para la vida actual, parece ser que una mezcla de este gas fue el idóneo para el origen de la vida. El líquido pretende a su vez reproducir los océanos primitivos o las masas de agua. Al calentar este «océano», el vapor de agua se eleva y mezcla con los otros gases de la «atmósfera», tras lo cual vuelve a caer en forma de «lluvia» junto con sustancias químicas recién formadas. El aparato está cerrado herméticamente para que todos los gases giren incesantemente sin escapar, de modo semejante a la familiar secuencia de evaporación-condensación que ocurre cotidianamente en la Tierra. En ausencia de la energía, los gases hacen exactamente esto: girar dentro del aparato sin sufrir ningún cambio; se niegan a reaccionar espontáneamente entre sí. Por ejemplo, cuando entran en contacto moléculas de metano y vapor de agua, no ocurre nada; necesitan un poco de ayuda a fin de reaccionar químicamente. Y esta ayuda, el catalizador, es cualquier clase de energía. En cuanto se aplica la energía, algunos de los enlaces existentes en cada molécula de gas se disocian, permitiendo con ello a los átomos y fragmentos moleculares liberados adoptar la forma de moléculas más complejas.

A veces, con objeto de acelerar las reacciones, los investigadores emplean mayores abundancias de gas de las supuestamente existentes en la Tierra primitiva. O bien incrementan la intensidad de la fuente energética hasta sobrepasar la que se supone que estaba presente hace miles de millones de años. El resultado es que las posibilidades de colisión entre las moléculas aumentan extraordinariamente, consiguiendo que el experimento se complete en pocas semanas. Francamente, los investigadores con cursos de duración limitada y subvenciones de un año no pueden permitirse el lujo de esperar varios centenares de millones de años para conocer el resultado de sus experimentos.

Al cabo de unos días de aplicar energía a los gases aparece un espeso caldo de color marrón rojizo en el sifón del fondo del aparato. Los análisis químicos revelan que este puré viscoso contiene moléculas considerablemente más complejas que las insertadas en un principio en el recipiente. Nadie imagine que algún ser vivo sale a rastras de este caldo primario. Pero varios de los productos moleculares se cuentan entre los precursores conocidos de la vida, ya que incluyen muchos de los aminoácidos y bases nucleótidas que comprenden los bloques básicos de toda la vida contemporánea.

La receta para la creación de los ácidos y bases preliminares de la vida no es muy rígida. Quizá nos sería posible realizar el experimento en nuestra bañera, aunque no es recomendable. Los gases simples, fuentes de energía y tiempos de cocción han variado mucho según los diferentes investigadores durante las dos últimas décadas. A condición de que no esté presente ningún gas de oxígeno, el resultado es invariablemente la síntesis de moléculas orgánicas complejas. En cambio, con dosis incluso pequeñas de oxígeno en el tubo de ensayo, los gases se oxidan, el caldo se desestabiliza y ninguno de los ingredientes de la vida hace su aparición. Irónicamente, aunque la mayor parte de la



vida actual de la Tierra requiere oxígeno, este gas habría actuado como un veneno letal durante las fases de formación de esta misma vida.

Es pertinente hacer aquí una consideración crítica de la cantidad y clase de energía empleada en estos experimentos. ¿Es razonable suponer que en la Tierra primitiva estaba presente la cantidad necesaria del tipo idóneo de energía? En los laboratorios se suele emplear la energía suministrada por electrodos que lanzan chispas sobre los gases del tubo de ensayo. Las chispas de los electrodos imitan a los rayos atmosféricos y pueden considerarse también como una simulación indirecta de otros tipos de energía indudablemente presentes en la Tierra primitiva. Además de los rayos atmosféricos, había seguramente mucha radiactividad y actividad volcánica, ambas generadoras de calor. Incluso los truenos garantizan la suficiente energía para provocar en la atmósfera primitiva de la Tierra algunas de las reacciones químicas que ocurren en los experimentos de laboratorio; si el trueno puede romper cristales de ventanas, también puede romper enlaces químicos. El bombardeo de meteoritos constituye

otra fuente de energía; enormes rocas atravesando la atmósfera generan con sus ondas de choque un calor a menudo suficiente para suscitar reacciones químicas.

La mayor parte de estas fuentes de energía tenían carácter local, y por ello fueron lo bastante intensas como para formar o romper enlaces moleculares solamente en puntos aislados de la Tierra primitiva. Pero la energía solar abarcaba todo el planeta. Aunque la luz solar corriente no es lo bastante energética como para provocar reacciones químicas, la radiación ultravioleta del Sol sí lo es. Sin oxígeno, no podía haber en torno a la Tierra una capa de ozono, y esta radiación ultravioleta no debió encontrar muchos obstáculos para llegar a la superficie terrestre. Cabe suponer que la energía solar, sustento actual de la vida, fue también el nutriente principal en la creación de esa misma vida hace miles de millones de años.

Los experimentos de laboratorio como estos son importantes porque demuestran que los bloques moleculares de la vida pudieron ser sintetizados de muchos modos diferentes durante la historia primitiva del planeta Tierra.

Sin embargo, estos ingredientes básicos no constituyen la propia vida; son mucho más simples que una sola célula. Los aminoácidos y bases nucleótidas son de hecho considerablemente menos complejas que las proteínas y los ácidos nucleicos presentes por doquier en la vida actual. ¿De qué modo, entonces, se convirtieron inicialmente los ingredientes de este caldo primario en proteínas y ácidos nucleicos? Al parecer, el viscoso líquido orgánico se concentró todavía más a fin de permitir una interacción no sólo más fuerte sino más seca.

Como se ha observado más arriba, dos aminoácidos pueden unirse para alcanzar el siguiente estadio de complejidad, a condición de que se elimine una molécula de agua. Esta condensación deshidratada de muchos aminoácidos puede convertir entonces cadenas de moléculas en proteínas complejas. Enlaces sucesivos de bases nucleótidas pueden asimismo formar largos ácidos nucleicos.

El calor, por ejemplo, pudo evaporar algo de agua, en especial en las orillas de un océano primario o una laguna. Parece razonable suponer que el repetido ir y venir de mareas en aguas poco profundas pudo conducir a un ciclo diario de deshidratación solar de moléculas en una laguna temporalmente seca durante la marea baja, seguida de una interacción ulterior de estas moléculas en el mar abierto durante la marea alta.

La condición opuesta —el frío— puede también eliminar eficazmente moléculas de agua de una mezcla orgánica. La conge-

lación transforma el agua de líquida en solida, permitiendo así que los ácidos y bases se concentren más y queden más enlazados. Un ciclo de congelación y deshielo podría permitir la formación de moléculas en cadena progresivamente mayores.

Hay un tercer mecanismo para eliminar agua. Aunque parezca imposible, se hace de manera constante en los organismos vivos; compuestas principalmente de líquido, las células de nuestros cuerpos fabrican proteína de forma rutinaria, y lo hacen mediante el empleo de catalizadores, moléculas de tercera clase que actúan de corredores. Los catalizadores que aceleran las reacciones de condensación en la vida contemporánea no existían probablemente en el océano primario. No obstante, muchos investigadores especulan sobre la existencia hace cuatro mil millones de años de otros catalizadores que provocan reacciones de condensación en el agua. Ciertos tipos de arcilla, por ejemplo, fueron en opinión de muchos científicos el andamiaje requerido para fabricar moléculas orgánicas de mayor tamaño en las orillas de océanos, lagos y ríos.

Los científicos no saben con seguridad si las primeras proteínas y ácidos nucleicos complejos tuvieron realmente su origen de forma similar a uno de estos ejemplos. No es probable que los fósiles muestren alguna vez el proceso exacto de la gradual aglutinación de moléculas preorgánicas hasta crear la vida propiamente dicha. Sin embargo, el calentamiento, la congelación y la catálisis son agentes plausibles de la autoconversión de aminoácidos y bases nucleótidas en proteínas y ácidos nucleicos.

La célula simple continúa siendo de modo sorprendente más compleja que cualquiera de estas moléculas preorgánicas. A fin de llegar a la misma raíz del árbol de la evolución, los bioquímicos intentan en la actualidad comprender con detalle cómo las proteínas y los ácidos nucleicos fueron a su vez capaces de forjar combinaciones más intrincadas de significación biológica. Pero comprender el origen tiene sus limitaciones. Los científicos sólo han podido suponer que repetidas interacciones entre las numerosas moléculas de la Tierra primitiva podrían haber producido eventualmente algo semejante a las proteínas actuales, el ADN, y células simples.

Los experimentos de laboratorio más avanzados llevados a cabo en años recientes apoyan esta teoría. La repetida deshidratación y exposición a la energía bajo las condiciones simuladas de la Tierra primordial producen moléculas orgánicas más complejas que los aminoácidos y bases nucleótidas. Pueden observarse en particular bajo el microscopio densos agregados de aminoácidos, llamados microsferas proteinoides. De un tamaño equivalente a una centésima parte de un milímetro, estos agregados no son proteínas conocidas como la insulina o la hemoglobina, sino compuestos similares a las proteínas cuya importancia en el origen de la vida es todavía incierta. Análisis químicos directos confirman que estas microsferas son realmente densos conglomerados de material organico flotando en un líquido principalmente inorgánico. Bajo el microscopio se ven brillar tenuemente como manchas de aceite sobre la superficie del agua o gotas de grasa sobre la superficie de una taza de caldo frío. Mientras algunos investigadores consideran a las microsferas proteinoides auténticas proteínas, otros no están tan seguros.

Las microsferas proteinoides producidas en experimentos de laboratorio tienen un notable parecido con células bacterianas simples. Dan la impresión de poseer una membrana semipermeable a través de la cual pueden entrar desde el exterior pequeñas moléculas para «alimentar» a la microsfera, pero que no permite la penetración de la mayoría de moléculas sintetizadas en el interior. Es posible observar por el microscopio alguna descarga de desechos, pero en general existe una neta entrada de material que recuerda en cierto modo a las células bioquímicas actuales. De hecho, estas curiosas bolsitas de sustancias químicas podrían considerarse capaces de comer, crecer y excretar, tal vez de forma muy semejante a un metabolismo primitivo.

Cuando se agita el recipiente del experimento a fin de crear alguna turbulencia en el líquido —imitando las oleadas del océano primitivo—, las microsferas proteinoides de mayor tamaño se disocian en otras menores, demostrando lo que algunos científicos consideran una forma primitiva de duplicación. Algunas microsferas se dispersan en una «muerte» aparente, otras crecen como sus «padres», pero acaban disociadas por otro acto de duplicación.

Así pues, las microsferas proteinoides guardan una primitiva semejanza con las células bacterianas simples. Algunas comen, otras crecen, otras se reproducen y otras mueren. ¿Acaso podemos llamarlas vivas? Es difícil decirlo. La frontera entre materia y vida no está bien definida; es confusa porque la propia vida resulta casi imposible de definir.

La mayoría de biólogos argumentan que las amebas están definitivamente vivas, pero no así el contenido molecular del caldo orgánico. Al parecer, las microsferas proteinoides están en una etapa intermedia. Pero si no son por lo menos progenitoras de los organismos vivos terrestres —la protovida—, se diría que la naturaleza ha jugado una broma pesada a la ciencia moderna.

Todas estas consideraciones teóricas y simulaciones experimentales sugieren que la vida es consecuencia lógica de principios químicos conocidos que operan en el ámbito atómico y molecular. Además, y esto es más fundamental, el origen de la propia vida parece ser una consecuencia natural de la evolución de dichos átomos y moléculas.

Pero tales afirmaciones carecen de pruebas concluyentes, ya que los experimentos de laboratorio aún tienen que crear algo más complicado que los precursores de la vida. Un gran abismo separa estas etapas preliminares de la evolución química del inicio de la evolución biológica de células vivas simples. Sin embargo, los bioquímicos han llegado a un acuerdo en relación con la imprecisa frontera en que termina la evolución química y empieza la evolución biológica.

La energía es lo único imprescindible en cualquier aspecto de la evolución, con independencia de si esta evolución atañe a materia que está claramente viva o a materia que decididamente no lo está. Ni la materia ni la vida pueden avanzar de un estado simple a uno complejo sin absorber cierta energía. Los objetos complejos tienen alguna organización, y la organización de cualquier clase requiere energía. Incluso cuando está totalmente formada y altamente evolucionada, ninguna materia avanzada, ya esté en estrellas o personas, puede sustentarse sin un continuo suministro de energía. Esta energía es el combustible, el alimento indispensable.

En el caso de las simulaciones de laboratorio descritas más arriba, la energía derivada de la descarga de chispas puede considerarse un «alimento explosivo» empleado para romper enlaces de las moléculas pequeñas, capacitándolas así para reunirse como grupos más complejos de átomos. Parte de la energía de la chispa es también absorbida y utilizada para reforzar los enlaces químicos necesarios para mantener juntos —organizar— los nuevos ácidos y bases más complejos. La espuma orgánica que flotaba sobre la superficie del océano primigenio se convirtió así en un enorme almacén de energía.

Se requiere una repetida aplicación de energía —es decir, una repetida alimentación— para construir las microsferas proteinoides. Una vez formadas, estas gotitas orgánicas requieren una alimentación adicional para mantener su organización molecular cada vez más intrincada. Se nutren de aminoácidos y bases nucleótidas que entran a través de sus membranas semipermeables; las microsferas extraen energía rompiendo químicamente los enlaces entre los átomos contenidos en dichos ácidos y bases. De este modo, las microsferas proteinoides «comen» en esencia absorbiendo minúsculas cantidades de energía de su medio ambiente.

¿Por qué obtienen las microsferas proteinoides energía de sus alrededores inmediatos? ¿Por qué no siguen utilizando una de las formas de energía externas, como la radiación solar, los rayos atmosféricos o la actividad volcánica? La respuesta es que la energía usada para crear microsferas suele ser demasiado potente para sustentarlas. A medida que las moléculas se hacen mayores y más complejas, se vuelven también más frágiles. Comen y se organizan absorbiendo energía, pero dicha energía tiene que ser leve y suave. (Es algo parecido a la diferencia entre regar una planta y ahogarla.) Los pequeños ácidos y bases capaces de pasar a través de las diminutas aberturas de la membrana de la microsfera contienen la cantidad justa de energía; permiten que las esferas proteinoides sobrevivan sin estar sujetas a la potente energía externa requerida para su síntesis anterior.

Aunque los científicos no tienen pruebas directas de la reunión de precursores de vida más avanzados, los estudios de laboratorio apuntan hacia un proceso de dos fases como el esbozado más arriba: fue necesaria una fuerte dosis de energía para formar a los precursores, pero su manutención requirió una energía más suave.

Pruebas circunstanciales y conocimientos bioquímicos hacen suponer a los científicos que las microsferas proteinoides consiguieron, una vez formadas, protección contra las condiciones energéticas incontroladas que las habían creado. Esto es razonable, ya que la Tierra de hace varios miles de millones de años se enfriaba rápidamente y adquiría una mayor tranquilidad biológica. A medida que pasaba el tiempo, los volcanes, terremotos y tormentas atmosféricas iban remitiendo gradualmente. La cantidad de radiación ultravioleta también disminuía a medida que la aparición de gases terrestres espesaba la atmósfera. Es probable que muchas sustancias prebiológicas encontraran refugio bajo superficiales capas de agua capaces de absorber cualquier potente radiación solar que lograse atravesar el aire.

A partir de este punto, los biólogos sólo pueden suponer que por lo menos una amalgama proteinoide fue eventualmente capaz de evolucionar y convertirse en algo que todos coincidiéramos en llamar una auténtica célula viviente. Hasta ahora, ningún fósil nos ha revelado nada sobre esta fase evolutiva inmediatamente anterior a la vida. Además, en experimentos de laboratorio no se han sintetizado nunca sustancias más complejas que las microsferas proteinoides, las cuales no poseen ni la molécula hereditaria del ADN ni un núcleo bien definido común a la mayoría de células contemporáneas. Por desgracia, los investiga-

dores no pueden explicar de momento cómo surgió la primera proteína de un medio que no contenía ácidos nucleicos, especialmente cuando la transmisión de información del ácido nucleico a la proteína es considerada por muchos como el dogma central de la biología molecular moderna.

La cuestión de qué apareció primero, las proteínas o los ácidos nucleicos —es decir, el «protobionte» o «gene desnudo»— se parece a la conocida paradoja del huevo o la gallina y representa uno de los grandes enigmas de la evolución cósmica. Cabe suponer que las aptitudes para el metabolismo y la reproducción se desarrollaron paralelamente, pero no lo sabemos con seguridad. Es preciso reconocer que existe una gran laguna en nuestro conocimiento directo de los sucesos ocurridos entre la síntesis de los precursores de la vida y la aparición de la primera célula auténtica.

El confuso intervalo entre la vida y la ausencia de vida preocupa tanto a los investigadores científicos como a los profanos. El principio central de la evolución química es muy claro: La vida ha evolucionado a partir de la ausencia de vida. Pero aparte de la intuición bioquímica y los experimentos de laboratorio para desentrañar los sucesos clave en la Tierra primigenia, ¿tenemos algún dato que nos sugiera que la vida se desarrolló efectivamente a partir de moléculas sin vida? Por fortuna, la respuesta es afirmativa.

La entidad más pequeña y simple que a veces parece estar viva se llama virus. Decimos «a veces» porque los virus poseen aparentemente los atributos de las moléculas sin vida y al mismo tiempo los de las células vivas. Los virus, que deben su nombre a una palabra latina que significa «veneno», se consideran causa de enfermedades. Aunque existen de variados tamaños y formas, todos los virus son de tamaño menor que una típica célula moderna. Algunos sólo contienen unos cuantos centenares de átomos. Así pues, al menos en lo que respecta al tamaño, los virus parecen llenar el vacío existente entre las células vivas y las moléculas carentes de vida.

Los virus contienen proteína y ADN, pero no mucho más; nada de aminoácidos o bases nucleótidas gracias a los cuales los organismos vivos crecen y se reproducen. Entonces, ¿cómo puede considerarse vivo a un virus? En realidad, no puede decirse que esté vivo mientras permanezca solo y aislado de los organismos vivos. Pero cuando entra en contacto con estos organismos, el virus tiene toda las propiedades de la vida. Empieza a vivir al inyectar su ADN en las células de organismos vivos normales. Los genes del virus se hacen con el control de una

célula y se establecen como el nuevo dueño y señor de la actividad química. Los virus crecen y se reproducen usando los ácidos y bases libres de la célula invadida, apoderándose de la función de ésta. Entonces se multiplican, rápida y desenfrenadamente, extendiendo la enfermedad y, si no se les detiene, matando en último término al organismo invadido.

Los investigadores, en consecuencia, no pueden clasificar a unos virus como virus vivos y a otros como carentes de vida. Incluso en el mundo contemporáneo, la frontera que separa la vida es una zona muy vaga. Por lo visto, los virus existen en este ámbito incierto y confuso.

¿Cómo fueron las primeras células vivas? Los científicos no lo saben con certeza. Lo más probable es que fueran frágiles entidades microscópicas, lo bastante frágiles como para ser destruidas por fuertes descargas de energía, y, sin embargo, lo bastante resistentes como para reproducirse, dando con ello origen a generaciones de descendientes.

Una cosa es segura: las primeras células, llamadas heterótrofas, tuvieron que encontrar la suficiente energía para continuar viviendo y organizándose, y debieron hacerlo mientras flotaban en la superficie del océano o cerca de ella, absorbiendo las moléculas de los ácidos y bases del nutritivo caldo del océano orgánico. Esta extracción de energía mediante la captura y descomposición química de pequeñas moléculas se llama fermentación, un proceso todavía empleado por las bacterias (en toneles de vino, masa de pan, etcétera) en la Tierra actual. Pero las células heterótrofas no podrían haber recogido indefinidamente la suficiente materia orgánica a la que debían su origen. ¿Por qué no? Porque el paso del tiempo produjo cambios irreversibles en el medio ambiente.

A medida que disminuía el calor de la Tierra, también lo hacían varias de las fuentes energéticas capaces de producir ácidos y bases. Mientras que originariamente había habido gran cantidad de jugosas moléculas orgánicas para alimentar a las células heterótrofas, la atmósfera más densa y la menor actividad geológica motivaron un descenso en nutrientes. Consumido con mayor rapidez de la que se necesitaba para volver a reproducirlo, el caldo orgánico empezó a escasear, hasta tal punto que las células primitivas tuvieron que competir entre sí para participar en el menguado suministro de nutritivos ácidos y bases. A la postre, las células heterótrofas devoraron toda la materia orgánica que flotaba en el océano. La síntesis orgánica de ácidos y bases mediante la luz solar, los relámpagos o volcanes no podía satisfacer el voraz apetito de la creciente población de células heterótrofas.

Esta escasez de alimento molecular fue una deficiencia casi fatal para el desarrollo inicial de la vida, una crisis ecológica de primer orden. Si nada hubiese cambiado, las formas de vida más simples de la Tierra habrían progresado hasta un callejón sin salida de la evolución: la muerte por hambre. La Tierra habría sido una roca estéril y sin vida. Afortunadamente, se produjo un cambio. Era preciso; nada permanece estacionario.

Algunas células primitivas —precursoras de las plantas— encontraron una nueva forma de conseguir energía, logrando así una única oportunidad de sobrevivir. Esta nueva técnica biológica empleaba el anhídrido carbónico, el más importante producto residual del proceso de fermentación. Mientras las primeras células se alimentaban de moléculas orgánicas en el mar y como resultado contaminaban la atmósfera, células más avanzadas usaron estos contaminantes para extraer energía. En este caso, la energía no se derivaba del anhídrido carbónico, sino de otra fuente bien conocida: el Sol.

Aquí la clave es la molécula clorofila, un pigmento verde con los átomos dispuestos de modo que la luz, al dar sobre la superficie de una planta, es atraída hacia el interior de la molécula. Las células avanzadas que contienen clorofila pueden extraer energía de la luz solar corriente (no de la fuerte radiación ultravioleta) mediante el proceso de la fotosíntesis, una reacción química que aprovecha la luz solar para convertir el anhídrido carbónico y el agua en oxígeno e hidratos de carbono. El gas de oxígeno escapa hacia la atmósfera, mientras los hidratos de carbono (azúcar) sirven como alimento. Éste es, pues, otro recurso de que disponen las células para «comer», o extraer energía de su medio ambiente.

¿Cómo llegaron a desarrollar la fotosíntesis algunas células protovegetales? Los científicos tampoco lo saben con certeza, y se limitan a sugerir que mutaciones fortuitas debieron alterar la estructura del ADN de algunas células primitivas. Aquellas cuyas moléculas permitieron la fotosíntesis pudieron sobrevivir gracias a la energía solar. Ya no tuvieron que seguir compitiendo para la obtención de los escasos ácidos y bases del océano. En suma, estas células llamadas autótrofas fueron capaces de adaptarse a los cambios ambientales. Tenían una ventaja, ya que estaban claramente más dotadas para sobrevivir a lo que debió ser la primera emergencia ecológica de nuestro planeta.

La fotosíntesis liberó a las formas de vida primitivas de la dependencia total de las moléculas orgánicas del caldo océanico. Las células primitivas capaces de utilizar la luz solar se extendieron por todas las aguas de la Tierra. Con el tiempo evolucionarían hasta convertirse en las variadas plantas que ahora están diseminadas por toda la superficie terrestre.

De hecho, la reacción fotosintética ha sobrevivido hasta la actualidad, pues todas las plantas siguen empleando rutinariamente la luz solar para sintetizar hidratos de carbono como alimento y liberar oxígeno durante el proceso. La fotosíntesis es la reacción química más frecuente de la Tierra. Unos cuatrocientos millones de toneladas de anhídrido carbónico se mezclan a diario con unos doscientos millones de toneladas de agua para producir aproximadamente trescientos millones de toneladas de materia orgánica y otros trescientos millones de toneladas de oxígeno.

Con la pérdida de su fuente alimentaria, las antiguas y primitivas células heterótrofas estaban naturalmente condenadas a morir, mientras las autótrofas estaban destinadas a seguir viviendo. La vida terrestre empezaba a usar la abundante fuente de energía primaria: la radiación solar. Esto ocurría hace unos tres mil millones de años.

La fotosíntesis operada durante millones de años, continuadamente, tiene su parte de responsabilidad en la creación de los combustibles fósiles. Plantas muertas y en descomposición, enterradas y prensadas entre capas de polvo y roca han sufrido cambios químicos que a lo largo de millones de siglos las han convertido en petróleo, carbón y gas natural. Estos combustibles fósiles, con sus ingentes cantidades de energía intacta, han hecho posible la civilización industrial. Pero son prácticamente irrenovables, por lo menos a escalas menores de decenas de millones de años. En realidad, miles de millones de años de depósitos de energía se agotarán en un breve plazo de tiempo. Una vez más, las cosas tendrán que cambiar, como ya ha venido sucediendo en el pasado.

El empleo de la luz solar por parte de las células fue un doble acontecimiento de gran importancia para la vida terrestre. No sólo proporcionó una ilimitada fuente de energía y aseguró un constante suministro de alimento, sino que también alteró drásticamente la atmósfera terrestre, dotándola de gran cantidad de oxígeno.

El oxígeno atmosférico ha tenido una enorme influencia sobre la abundancia y diversidad de la vida en la Tierra. ¿Por qué? Porque la liberación fotosintética de moléculas de oxígeno en una atmósfera que anteriormente tenía pocas o ninguna motivó importantes cambios ambientales. Tras la interacción con la radiación ultravioleta del Sol, la molécula de oxígeno diatómica se descompone en dos átomos de oxígeno. Tres átomos de oxígeno se mezclan entonces cerca de la parte superior de la atmós-

fera, formando grandes cantidades de oxígeno triatómico llamado ozono. (*Ozono* se deriva del griego y significa «oler»; el picante gas de ozono puede olerse a menudo cerca de algunas máquinas que utilizan radiación ultravioleta.) Ahora el ozono rodea completamente nuestro planeta en una capa delgada a aproximadamente cincuenta kilómetros de altitud, protegiendo eficazmente a la superficie de una mayor exposición a la nociva radiación ultravioleta.

Cuando la capa de ozono hubo madurado, la supervivencia ya no dependía de la protección de una capa de agua, o una roca u otro objeto que actuara de barrera contra las duras condiciones del mundo real. La vida ya era libre de poblar todos los rincones del planeta Tierra. En resumen, la vida podía invadir regiones donde aún no había existido antes.

Nada de esto sucedió de la noche a la mañana. La pantalla de ozono necesitó tiempo para establecerse. El proceso entero fue resultado de una aceleración general: las células autótrofas productoras de oxígeno tenían más posibilidades de supervivencia y, por lo tanto, de reproducción. Cuanto más se reproducían, más oxígeno se acumulaba en la atmósfera. Y más oxígeno significaba más ozono. Pero este ozono protector tardó en desarrollarse. ¿Cuánto tiempo? Quizá varios miles de millones de años a partir del comienzo de la fotosíntesis.

Algunos cálculos sugieren que la capa de ozono no fue una protección realmente eficaz contra la radiación ultravioleta del sol hasta hace seiscientos millones de años. Hay también pruebas irrefutables de que la vida empezó a ser variada y extendida alrededor de la misma época. Con anterioridad a estos seiscientos millones de años sólo existían formas de vida primitiva. En cambio, a partir de entonces se produjo un rápido incremento del número y la diversidad de organismos vivos complejos... una explosión demográfica de primera magnitud.

¿Qué motivó esta explosión de actividad biológica? En gran parte, la presencia de oxígeno, que permitió a los organismos obtener energía para la vida mediante un sistema nuevo más eficaz. Las primeras formas de vida, más primitivas, que se alimentaban por medio de la fermentación, fueron reemplazadas por formas de vida más avanzadas que desarrollaron la fotosíntesis como medio de procurarse alimento. Finalmente, organismos más complejos —precursores de los animales— empezaron a convertir el oxígeno en su principal fuente de nutrición. Empleando oxígeno, estos organismos podían obtener más energía de la misma cantidad de alimento. Junto con una capa ya bien establecida de ozono, esta disponibilidad global del oxígeno significó que la vida ya podía mantenerse y reproducirse en toda clase de hábitats nuevos.

Las duras condiciones previas bajo las que la incipiente vida había tenido que luchar ya no existían. La Tierra se había transformado en un lugar agradable donde vivir. Y los principales organismos de aquel tiempo aprovecharon este medio ambiente más propicio.

La respiración es un proceso químico mediante el cual las células emplean oxígeno para emitir energía. La ingestión de oxígeno («respiración») ayuda al organismo a digerir los hidratos de carbono de su cuerpo, cuyos productos residuales son anhídrido carbónico y agua. La respiración, pues, es justo lo contrario de la fotosíntesis, con una diferencia importante. Mientras la energía de la fotosíntesis tiene que ser absorbida para que produzca los nutritivos hidratos de carbono, en la respiración es emitida gran parte de la misma energía al descomponer el hidrógeno los enlaces químicos de dichos hidratos de carbono.

Hoy en día, estos dos procesos —la fotosíntesis vegetal y la respiración animal— dirigen el caudal de energía y materias primas que fluye por toda la biosfera. Esta energía vital es de una sola dirección. Se origina en el Sol, se absorbe en la fotosíntesis, se emite por la respiración y se consume en el proceso de la vida. El anhídrido carbónico, el agua y el oxígeno son incesantemente intercambiados entre la fotosíntesis y la respiración; su empleo repetido describe un ciclo completo: las plantas usan polución animal, mientras los animales usan polución vegetal. La naturaleza sabe cómo reciclar.

Que nosotros sepamos, el establecimiento de este eficiente flujo de energía —del Sol a los organismos avanzados— contribuyó grandemente a la verdadera explosión de organismos biológicos ocurrida hace varios centenares de millones de años. El intercambio de energía solar sigue produciéndose en la actualidad. Ahora suministra energía a los seres humanos; si somos inteligentes, algún día la suministrará a nuestra civilización tecnológica.

¿Cómo pueden saber tanto los científicos sobre episodios anteriores de la vida en la Tierra? Sin preocuparnos ya por los detalles exactos; ¿cómo es posible trazar siquiera las líneas generales de hechos tan remotos en el tiempo? La respuesta es que nos guían muchas claves conservadas en las viejas rocas de nuestro planeta, la mayoría de las cuales son restos de organismos vivos.

Las formas de vida suelen empezar a descomponerse inme-



diatamente después de la muerte. En cuanto termina la función de absorber energía, se inicia el desorden. La entropía aumenta, obedeciendo a las leyes básicas de la termodinámica. Los organismos muertos —incluso los huesos— se descomponen con rapidez; al cabo de pocos días las antiguas proteínas se convierten en sustancias fétidas. Así es cómo todas las formas de vida —incluyendo a los seres humanos— devuelven al planeta los elementos que éste les había prestado.

Pero hay algunos ambientes especiales que pueden limitar la descomposición, como las regiones polares, las cumbres de montañas altas y los profundos fondos oceánicos. Las bajas temperaturas y el agua sirven para retrasar la corrupción. Por ejemplo, un organismo vivo que hubiera perecido junto a un río o a la orilla del mar, podría estar enterrado bajo capas de arena y sedimentos. La lava volcánica es otro material donde pueden estar enterradas diversas formas de vida, en este caso bajo montículos de ceniza. Con el tiempo, los sedimentos de arena o lava se endurecen y forman una roca que sepulta los restos de los organismos vivos. Así, aunque las partes carnosas de los antiguos organismos suelen desaparecer, su estructura ósea permane-

ce a veces intacta, hasta que causas naturales (como cambios en la corteza terrestre) o sucesos provocados por el hombre (expediciones arqueológicas) la desentierran. Estos restos se llaman fósiles, vestigios visibles de organismos muertos que un día estuvieron vivos.

El estudio exhaustivo de los fósiles descubiertos hasta la fecha ha permitido a los biólogos elaborar una historia casi completa. Valiéndose de diversas técnicas, pueden determinar aproximadamente cuándo vivieron diversos organismos, e incluso deducir la aparición periódica de nuevas formas de vida y la desaparición de otras. Algunos tipos de vida sobrevivieron durante largos periodos de tiempo, mientras otros parecen haber sucumbido poco después de su creación.

El sentido común sugiere que las rocas más antiguas contienen sólo restos de vida simple, mientras las más jóvenes ocultan en su mayoría vida compleja. Al parecer, muchas formas de vida sólo pudieron sobrevivir incrementando su complejidad.

Los fósiles más antiguos tienen una estructura celular parecida a la de las actuales algas azules, un musgo bacteriano filamentoso que se encuentra a la orilla de lagos, ríos e incluso piscinas. No demasiado complejos, estos fósiles carecen de núcleos biológicos bien desarrollados, y sin embargo, estas formas de vida debieron alimentarse mediante la fotosíntesis, ya que se encuentran a menudo productos de clorofila en su inmediata proximidad. Al parecer, estos fósiles, los más antiguos de todos, son restos de células autótrofas.

En la pasada década se descubrieron fósiles de las células más primitivas, incrustadas en rocas de sedimentación africanas y australianas a las que se atribuye una edad aproximada de cuatro mil millones de años, la cual debe ser también la edad de estas células. De hecho, no se puede estimar la fecha de estos fósiles, ya que las técnicas radiactivas no sirven para las sustancias de carbono que tengan más de cuarenta mil años, pero parece inconcebible que algas de una época posterior pudieran estar tan profundamente incrustadas en estas antiquísimas rocas.

No se conocen fósiles de las más antiguas células heterótrofas. Moléculas pequeñas pueden introducirse en las más densas formaciones rocosas, por lo que no hay modo de saber si los aminoácidos y bases nucleótidas que contaminan las rocas antiguas son tan viejos como ellas. Incluso aunque existieran técnicas que permitieran a los científicos la búsqueda de materia orgánica prebiótica, no es probable que pudiera encontrarse. Las células heterótrofas debieron devorar toda la materia orgánica, sin dejar el menor vestigio de caldo primario en ningún lugar

de la Tierra. Por lo tanto, los científicos no pueden estimar ni la cantidad de tiempo requerida por las células autótrofas para eliminar a las primitivas heterótrofas, ni cuándo aparecieron estas últimas. Lo único que podemos decir con certeza es que el origen de la vida no se remonta a más de mil millones de años después de la formación del planeta Tierra. Es posible que tardara aún menos, pero tratar de fijar una fecha sería mera especulación.

Pruebas de una vida más reciente, aunque todavía muy antigua, han sido desenterradas en numerosos puntos de nuestro planeta. El lado norte del Lago Superior de Ontario es especialmente rico en fósiles antiguos, y la formación rocosa de los alrededores tiene, según las mediciones radiactivas, algo más de dos mil millones de años. Incrustados en la piedra caliza hay unos fósiles llamados estromatolites, colonias de algas dispuestas en capas y originados cuando las primitivas células autótrofas que vivían en grupo quedaron atrapadas entre el sedimento que más tarde se convirtió en roca. El examen concienzudo de esta antiquísima roca canadiense revela por lo menos una docena de diferentes tipos de algas, todas ellas organismos extremadamente simples si se comparan con la complejidad de las células actuales. Que nosotros sepamos, estas células de dos mil millones de años aún no tenían núcleos biológicos bien desarrollados. Y, pese a la aglomeración, cada célula debió funcionar por separado y no en colaboración con las más próximas. Eran todavía formas de vida unicelulares.

Las formaciones rocosas de mil millones de años esparcidas por todo el globo contienen a menudo restos de células autótrofas asombrosamente bien conservados. Han podido identificarse muchos tipos distintos de microfósiles, varios de ellos de estructura similar a la de las actuales algas azules. Además, los fósiles de este período marcan la aparición de los primeros organismos auténticos: grupos organizados de células, que son los antepasados de las plantas y los animales modernos.

A estas alturas, las formas de vida unicelular ya existían en la Tierra desde hacía casi tres mil millones de años. Su tamaño había aumentado, eran más complejas y tal vez funcionalmente diversas. Y habían desarrollado núcleos biológicos completos, incluyendo las moléculas hereditarias del ADN. Más importante todavía, estaban empezando a prolongar su supervivencia trabajando juntas como unidades multicelulares. Hace mil millones de años, la vida había alcanzado un hito importante: se había organizado.

Y, sin embargo, mil millones de años atrás, eso era todo. La primitiva vida proliferaba en el océano, pero, fuera, nada seguía su ejemplo. Los fósiles no aportan ninguna prueba de que las

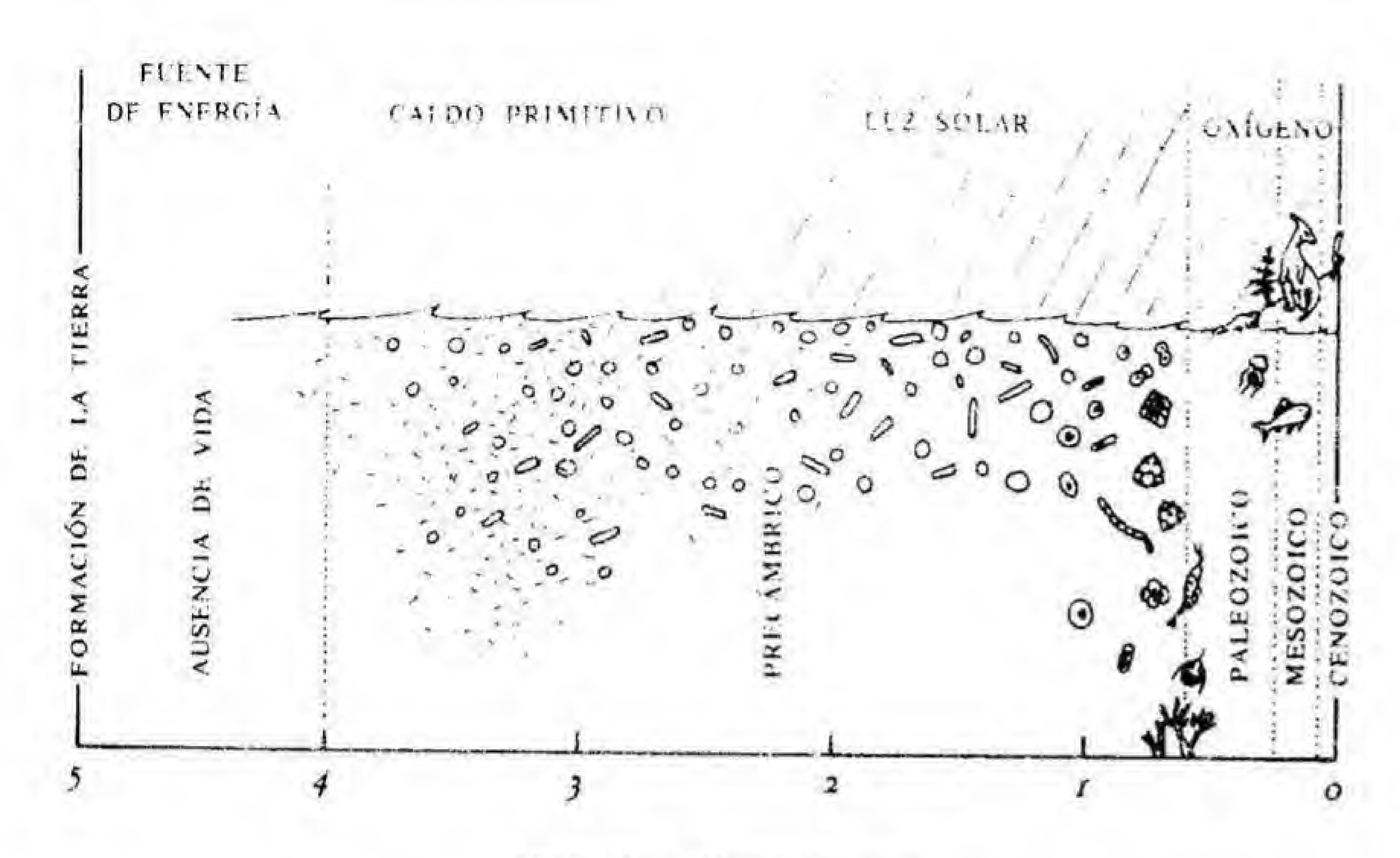
plantas adornaran ya el paisaje terrestre. Ningún animal reptaba, nadaba o volaba cerca de la superficie. Y, desde luego, no existían aún hombres ni mujeres.

Para comprender todo el espectáculo de la vida, la pasada y la presente, hemos de ir más allá de los análisis bioquímicos de materia microscópica. El estudio de una sola célula es suficiente para revelar la diferencia operacional entre la vida y la ausencia de vida, pero no basta para ilustrar todo el espectro de vida en la Tierra. A fin de descifrar la complejidad de la vida, es necesario estudiar organismos enteros. Del mismo modo que es imposible comprender el funcionamiento de un automóvil desmontándolo y midiendo sus átomos y moléculas constituyentes, el análisis macroscópico de los organismos vivos enteros complementa con eficacia el estudio microscópico de sus células.

En la actualidad, los biólogos reconocen que hay por lo menos dos millones de diferentes formas de vida animal y vegetal en nuestro planeta. Esta cantidad abarca toda la gama de vida terrestre actual, desde diminutos microorganismos a ballenas gigantes y sequoias. Constantemente se descubren nuevas formas de vida. Y sin embargo, a pesar de esta enorme variedad de vida actual, los fósiles indican que alrededor de un noventa y nueve por ciento de todas las formas de vida que han existido en la Tierra está actualmente extinguido.

Los fósiles narran la siguiente historia de la vida relativamente reciente en el planeta Tierra: Hace menos de mil millones de años, cuando los organismos multicelulares aprendieron a utilizar el oxígeno, evolucionaron con rapidez en seres altamente especializados. Estos animales que respiraban oxígeno, los primeros antepasados del hombre, pululaban en el mar, alimentándose de plantas y de seres de su propia especie. Algunos sólo sabían flotar en el agua, otros se anclaban en las pendientes del fondo marino, y otros tenían cierta movilidad en el agua. Casi todos estos seres, vivos entre quinientos y mil millones de años atrás, tenían cuerpos blandos. De ahí que el historial de fósiles de los primeros organismos respiratorios sea muy fragmentario, porque al carecer de huesos o caparazones, muy poco de ellos ha permanecido intacto hasta nuestros días.

Más de la mitad de todos los fósiles son trilobites, seres parecidos a langostas de una enorme variedad. Algunos tenían cabeza, otros, al parecer, carecían de ella; otros tenían doce ojos y otros ninguno. La mayoría eran muy pequeños, de pocos centímetros de longitud, pero algunos llegaban a medir medio metro de la cabeza a la cola. Aunque ahora no existen, los paleobiólo-



Miles de millones de años

gos están razonablemente seguros de que alguna versión de trilobites dio origen a todos los animales de la actualidad.

A medida que pasaban los años, las formas de vida se multiplicaban con rapidez. Cada tipo de organismo respondió a cambios del medio oceánico, continental y atmosférico. Cada uno de ellos intentó adaptarse para sobrevivir. Hace quinientos millones de años, los gusanos, almejas y caracoles gobernaban el mundo.

La repentina abundancia de fósiles de hace seiscientos millones de años no sólo refleja el probable establecimientos de la capa de ozono y del ciclo de respiración-fotosíntesis, sino también el desarrollo de esqueletos primitivos. Los paleontólogos consideran que éste fue el comienzo de una nueva era en la historia de la vida en nuestro planeta. Todo el tiempo anterior a los seiscientos millones de años se denomina sencillamente períodos Precámbrico. Desde entonces ha habido otros tres períodos, que subdividen los tiempos más recientes: el Paleozoico, palabra griega para «vida antigua», el Mesozoico, o «vida intermedia», y el Cenozoico, o «vida reciente» A grandes rasgos, esos períodos se iniciaron, respectivamente, hace 570 millones, 225 millones y 70 millones de años.

Los fósiles del Paleozoico revelan que los primeros peces aparecieron hace por lo menos cuatrocientos millones de años, los

primeros anfibios y bosques hace unos trescientos millones y los primeros reptiles e insectos poco tiempo después. En el transcurso de cien millones de años aproximadamente, la vida salió de su cuna oceánica, y se aclimató en la orilla. La exploración inaugural de la tierra desconocida fue probablemente realizada por plantas marinas que emigraron a la franja estéril y rocosa del litoral. Algunos tipos de peces que dependían de esta vegetación debieron seguir a su fuente alimentaria, invadiendo intencionadamente la tierra, mientras otros fueron arrastrados a la orilla por tormentas o privados de su medio acuático al evaporarse las lagunas poco profundas. Esta especie de peces aclimatados a la tierra se convirtieron en anfibios de cuatro patas que respiraban aire; los que no lograron aclimatarse, se extinguieron. Los detalles son fragmentarios porque los geólogos ignoran dónde se hallaban estas antiguas costas; todo esto precedió a la separación de la masa de tierra ancestral que dio origen a los continentes tal como ahora los conocemos. Los fósiles sólo dejan patente una cosa: los descendientes de aquellas primeras plantas terrestres se convirtieron en los primeros bosques de nuestro planeta, y ciertos descendientes de los anfibios se transformaron en los animales que vivieron en dichos bosques.

Al final del período Paleozoico, la vida estaba firmemente implantada en el mar, en la tierra y en el aire. Hace doscientos millones de años existían buenas oportunidades de vida. La tierra en particular, con sus verdes extensiones y selvas vírgenes, permitía proliferar la vida animal con asombrosa diversidad. Las especies no dejaban de multiplicarse; los fósiles testimonian, por ejemplo, la existencia de mil clases diferentes de cucarachas; la versión doméstica — la cucaracha común — es superviviente directa, y muy resistente, de la última parte del período Paleozoico. Toda la vida terrestre estaba dominada por los reptiles, una nueva forma de vida que, en el transcurso de millones de años, evolucionó a partir de los anfibios vertebrados. La conquista de la tierra fue completa, ya que los reptiles se diseminaron hasta llenar todos los rincones imaginables del planeta. Antepasados de casi todos los animales existentes ahora en la Tierra, los reptiles de hace doscientos millones de años habían desarrollado columnas vertebrales flexibles, patas móviles y cerebros más perspicaces que los de cualquier otro animal que hubiera habitado la Tierra hasta entonces.

Los fósiles del Mesozoico revelan que muchas formas de vida no sólo medraron sino que también evolucionaron hacia una mayor complejidad. La vida vegetal prosperaba, dando los primeros pasos hacia sus formas actuales. Aparecieron las flores

de colores deslumbrantes y perfumes intensos, todo con el fin de atraer a insectos polinizadores. Y alzaron el vuelo las primeras aves, la mayoría pequeñas como los gorriones de la actualidad.

Pero el punto culminante del período Mesozoico fue la primera aparición de los mamíferos, animales de sangre caliente capaces de obtener calor de los alimentos digeridos y protegerse así de los ambientes fríos. Los fósiles testimonian que en este período de ciento cincuenta millones de años se desarrollaron tres tipos de mamíferos. Los primeros fueron probablemente antepasados del oso hormiguero actual: seres primitivos recubiertos de piel que amamantaban a sus crías pero, como los reptiles, ponían huevos en lugar de parir crías aptas para la vida en el mundo exterior. Luego un grupo de mamíferos más avanzados debieron de parir crías semejantes a las de sus descendientes actuales, el canguro y el koala; pero aquellas crías eran tan pequeñas e inmaduras que tenían que ser incubadas en una bolsa de piel bajo el vientre materno. Hacia finales del Mesozoico aparecieron los mamíferos auténticos, que no ponían huevos ni necesitaban bolsa para sus crías.

Aparte de este esbozo, los detalles de la ascendencia de los mamíferos durante el período Mesozoico son algo confusos, ya que fueron completamente eclipsados por los reptiles más potentes de todos los tiempos: los dinosaurios. El nombre de estos monstruosos animales se deriva de las palabras griegas *deinos* (terrible) y *sauros* (lagarto). En nada parecidos a los lagartos, serpientes o cocodrilos actuales, los dinosaurios se extendieron por toda la Tierra en la época de su esplendor, hace unos cien millones de años, con tal habilidad y poder que invadieron tierra, mar y aire hasta dominar totalmente nuestro planeta. Los dinosaurios eran en su mayoría gigantescos animales terrestres, aunque entre sus parientes hubiera espantosos reptiles anfibios capaces de engullir de un bocado a la gran ballena blanca actual, y horribles seres voladores cuyas alas tenían una envergadura comparable a la de los cazabombarderos modernos. Se han descubierto sus fósiles en todos los continentes del mundo, excepto en los polos.

Hasta hace poco tiempo prevalecía la opinión de que los dinosaurios eran animales bastante torpes, seres de sangre fría y cerebro pequeño. En climas gélidos, o incluso durante la noche, el metabolismo de estos enormes reptiles se habría reducido, dificultando sus movimientos y por lo tanto su aptitud para buscar alimento y para sobrevivir. Pero actualmente está surgiendo un criterio diferente y polémico en muchos laboratorios paleontológicos. Estudios recientes de fósiles de dinosaurios indican que estos monstruos podrían haber tenido grandes corazones de cuatro cavidades, como los de los mamíferos y aves. Semejante corazón podría haber bombeado sangre a través de los órganos, permitiendo a los dinosaurios mantener un alto nivel de actividad física. Si estas recientes interpretaciones son correctas, los dinosaurios debían tener sangre caliente, y ser por lo tanto animales de movimientos rápidos. Además, aunque es evidente que sus cerebros eran pequeños en comparación con los de los mamíferos actuales, fueron bastante listos para su tiempo. De hecho, ninguna especie capaz de dominar la Tierra durante casi cien millones de años podría haber sido muy torpe. En comparación, los seres humanos han dominado hasta ahora durante poco más de dos millones de años.

Todos estos prehistóricos depredadores de tierra, mar y aire desaparecieron con asombrosa brusquedad hacia el final del período Mesozoico. La presencia de los dinosaurios desaparece misteriosamente de entre los fósiles. Nadie sabe por qué. Tampoco sabe nadie cómo lograron los pequeños mamíferos sobrevivir al reino del terror mantenido por estos monstruosos animales durante cien millones de años. Fuera cual fuese la razón, no sólo afectó a los dinosaurios, sino también a muchas otras formas de vida. Los fósiles demuestran que, hace casi cien millones de años, prácticamente la mitad de todas las plantas dejó de existir. También perecieron numerosas especies de mamíferos, reptiles y aves.

Se han ofrecido muchas explicaciones de la repentina y total desaparición de los dinosaurios. Plagas devastadoras, inversiones del campo magnético, un incremento en la actividad tectónica, así como marcadas variaciones climáticas provocadas por impactos de asteroides o explosiones de supernovas; se ha aducido todo esto, de mayor o menor mérito, aunque nada de ello enteramente convincente. Exasperados, algunos investigadores llegan a decir en broma que los dinosaurios murieron de estreñimiento, ya que una gran variedad de plantas oleaginosas de que probablemente se alimentaban también se extinguió en aquella época. Sea cual fuere el motivo de la desaparición de los dinosaurios, no cabe duda de que fue un cambio espectacular. Sería útil continuar la búsqueda de la causa de su extinción, porque nadie sabe si aquel cambio repentino podría repetirse. Como especie dominante de la Tierra, somos ahora nosotros los que más perderíamos con ello.

Pese a nuestro conocimiento de los dinosaurios, ningún ser humano vio jamás a ninguno. Además, sus restos han permanecido enterrados durante casi cien millones de años, hasta que el *Homo sapiens* descubrió su existencia hace solamente un siglo. Por extraño que parezca, los padres de nuestros bisabuelos no supieron de la existencia de los dinosaurios. En realidad, hasta

hace poco tiempo no hemos sabido que probablemente no estaríamos aquí de no haberse extinguido estos gigantescos animales. Hasta la desaparición de los dinosaurios no comenzó el auge espectacular de los mamíferos... incluidos nosotros, los seres humanos.

Los comienzos del período Cenozoico vieron, hace casi cien millones de años, un reparto de actores casi completamente nuevo. Los dinosaurios se habían extinguido y el anterior dominio de los reptiles sobre los mamíferos se invirtió totalmente. El planeta había vuelto a la tranquilidad anterior a los dinosaurios, y ciertas regiones incluso se despoblaron. Los mamíferos se habían apoderado del mundo, aunque no libraron ninguna batalla. Podríamos decir que los humildes heredaron la Tierra.

Fósiles relativamente recientes de hace cincuenta millones de años revelan que la mayoría de mamíferos tenían cerebros pequeños, grandes mandíbulas, y patas y dientes torpes e ineficaces. No obstante, se multiplicaban con profusión, aumentando en número y diversidad. Como siempre, el cambio dominaba por doquier. Los períodos glaciares se sucedían; los continentes se dividían y separaban. Las formas de vida tenían que adaptar constantemente sus hábitos a fin de incrementar sus posibilidades de supervivencia. Muchos de estos primeros mamíferos se extinguieron y fueron reemplazados por especies mejor adaptadas.

En un tiempo relativamente corto, los mamíferos habían evolucionado y constituían un asombroso surtido de seres vivientes. Hace unos cuarenta millones de años, los antepasados de mamíferos modernos como el caballo, el camello, el elefante, la ballena y el rinoceronte, entre otros, fueron cambiando gradualmente, aunque sus formas serían totalmente irreconocibles si se compararan con sus descendientes actuales. La mayoría aumentó de tamaño y mejoró sus características generales en un período de veinte millones de años.

Muchas especies han aparecido y desaparecido en el planeta Tierra. Algunas eran organismos insignificantes, mientras otras dominaban la tierra, el mar y el aire. Durante centenares de millones de años ha habido un constante desfile de seres nuevos, muchos de los cuales han sido dominantes. Sin embargo, sólo la última de estas formas de vida dominantes — hombres y mujeres — ha sido capaz de saber algo sobre sus antepasados. Sólo los seres humanos han sabido descubrir y comprender la asombrosa crónica de todas las grotescas formas de vida que prevalecieron en un tiempo en nuestro planeta.

¿Qué consecuencias podemos sacar de tan inmensa variedad de vida pasada y presente sobre la Tierra? ¿Existe alguna lógica unificadora que establezca alguna relación entre todas las formas de vida? En realidad, la clasificación es el primer paso si queremos descubrir las causas de la abundancia y diversidad de vida en nuestro planeta.

Toda la vida actual, así como los restos fosilizados de vida antigua, pueden clasificarse de modo general como bacterias, plantas o animales. Estas clases, a su vez, pueden dividirse en diferentes especies, subclasificación empleada generalmente para distinguir no sólo la similitud estructural, sino también la capacidad de aparearse y producir crías fértiles.

Comprender este tema requiere en realidad algo más que la mera clasificación de las formas de vida. Los seres vivos no presentan siempre las características exactas de su especie. En otras palabras, las especies individuales suelen presentar pequeñas, pero perceptibles, variaciones de la clasificación «ideal», ligeras alteraciones del espécimen medio con el que puede compararse cada organismo individual. Esto ocurre en todas las especies, y puede verse tanto en los seres actuales como en los fósiles.

Como en muchos aspectos de la materia universal, los cambios sutiles experimentados por las formas de vida contienen la clave para comprender la evolución de la vida a través del tiempo.

La teoría de la evolución biológica, concebida por los naturalistas británicos del siglo XIX Charles Darwin y Alfred Wallace independientemente, explica dos características sobresalientes de los fósiles: Primera, que los organismos vivos suelen hacerse más complejos con el tiempo; y segunda, que los miembros de todas las especies presentan alguna variación de su categoría «ideal».

Estos dos hechos contradicen de plano la suposición tradicional de que la naturaleza es inmutable. Como Copérnico cuatro siglos antes, y Heráclito con veinte siglos de anticipación, Darwin y sus colegas se enfrentaron con la misma clase de oposición, dirigida por partidarios de Aristóteles que se negaban a admitir cambios en las cosas terrestres. Pero una teoría estática de la vida es sencillamente insostenible. Todo cambia con el tiempo, incluyendo a la vida. La única explicación plausible es la vida dinámica y evolutiva.

El principio central de la evolución biológica sostiene que los seres vivos cambian, algunos para mejorar y otros para empeorar. Especies que sobreviven durante períodos prolongados

pueden cambiar drásticamente de pronto, convirtiéndose a veces en especies totalmente nuevas. Algunas especies se extinguen; otras resurgen. Los organismos de estructura similar tienen una ascendencia similar y están estrechamente emparentados. Los que tienen estructuras diferentes han acumulado estas diferencias durante prolongados períodos de tiempo y, por consiguiente, su parentesco es remoto.

La evolución biológica no es un credo; es un hecho. Los fósiles ya no permiten dudar de la evolución. El aspecto «qué» de la evolución está respaldado por datos. Pero el aspecto «cómo» ya es menos claro.

Los mecanismos exactos de la evolución biológica componen una teoría: una teoría desarrollada para explicar un grupo de hechos. Es una consecuencia del método científico: Se realizaron observaciones de restos fosilizados de seres vivos; se elaboró una hipótesis para explicar estos hechos; y los experimentos subsiguientes han servido para reforzar y revisar las complejidades de la teoría durante el siglo pasado.

¿Cuál es el mecanismo de la evolución biológica? ¿Cómo funciona? El motor principal es el medio, las condiciones macroscópicas que rodean a los organismos vivos. La temperatura, la densidad, el alimento, la composición y calidad del aire —además de las barreras naturales como ríos, lagos, océanos y montañas— son influyentes factores ambientales. Hay otros factores más sutiles, como conflictos de personalidad, vecindario y gran número de causas sociológicas enormemente complejas. La situación se complica aún más por el hecho de que estas presiones ambientales cambian constantemente, aunque con lentitud. La evolución biológica estipula que todas las formas de vida reaccionan a los cambios ambientales, inhibiendo algunas características y fomentando otras, y en cualquier caso produciendo una inmensa diversidad de especies en el transcurso del tiempo. Los cambios en el medio ambiente y en la vida ocurren como regla, no como excepción.

Las observaciones revelan que, aunque todas las especies se reproducen, pocas de ellas muestran gigantescos incrementos de población; el número total de cualquier especie se mantiene bastante constante, ya que no hay explosiones demográficas espectaculares. Además, el proceso de reproducción no es nunca perfecto; la progenal de cada generación no es nunca una copia exacta de sus progenitores. Esto implica que la mayoría de crías no sobrevive para reproducirse. Toda vida tiene que luchar y competir a fin de perdurar.

La selección natural, una expresión acuñada por el propio Darwin, es el mecanismo que guía la evolución de la vida a través del tiempo. Reconociendo que la mayoría de miembros de una especie presenta alguna variación con respecto a su ideal, Darwin sugirió que los organismos que muestran una variación particularmente adaptada a su medio ambiente son los más aptos para sobrevivir. Han sido naturalmente seleccionados para vivir. En cambio, los organismos que tienen variaciones desfavorables son los seleccionados para la extinción. Sólo las formas de vida capaces de adaptarse al medio cambiante sobreviven para reproducirse, transmitiendo así estas variaciones y características favorables a sus descendientes.

Semejantes características favorables se hacen más pronunciadas en cada individuo de las generaciones sucesivas, y no sólo esto, sino que además aumenta el número de individuos que poseen estos rasgos favorables. Dichos individuos suelen tener familias numerosas, al gozar tanto ellos como su progenie de mayores oportunidades para sobrevivir. Sus descendientes se multiplican con más rapidez que la de sus congéneres menos favorecidos, y en el curso de muchas generaciones su progenie reemplaza a los herederos de individuos desprovistos de las características favorables.

La selección natural recuerda la bien conocida frase de «sobrevive el mejor». Moldea literalmente las formas de vida. Con el paso del tiempo suficiente, la acción de la selección natural puede alterar considerablemente la forma, la constitución e incluso la existencia de los individuos; las especies viejas desaparecen como consecuencia de cambios ambientales y son reemplazadas por otras nuevas.

No es fácil observar a la selección natural en acción; se requiere el paso de mucho tiempo para que sea perceptible una clara variación en una especie. Se han conseguido algunos éxitos reproduciendo en el laboratorio ambientes naturales. Como los experimentos sobre el origen de la vida, éstos también son simulaciones que intentan estudiar la adaptación de la vida a cambios del medio ambiente. Los resultados corroboran la teoría de la evolución biológica mediante la selección natural. He aquí un ejemplo de uno de estos experimentos.

Dos grupos de ratones del campo, uno de pelaje oscuro y el otro de pelaje claro, se dejaron sueltos en un pequeño granero junto con una lechuza. Se eligió una paja y un revestimiento del suelo que tuviera el mismo color oscuro de uno de los grupos de ratones. Esto daba a los ratones de pelaje oscuro una ventaja ambiental, mientras los de pelaje claro estaban en franca desventaja. Al término de varios experimentos cuidadosamente controlados, la lechuza había capturado a muchos más ratones de pelaje claro. Cuando se cambió el revestimiento del suelo por

otro parecido al pelaje de estos últimos — lo cual correspondía a un cambio ambiental que daba a los ratones de pelaje claro una mayor oportunidad de sobrevivir —, los resultados se invirtieron; la lechuza capturaba con facilidad a los ratones de pelaje oscuro. Este es un ejemplo de cómo pequeñas variaciones en una especie pueden darle una ventaja competitiva. Los ratones que sobrevivieron, pudieron lograrlo porque estaban mejor adaptados al medio ambiente. Habían sido naturalmente seleccionados para vivir y reproducirse.

También se han podido advertir algunos ejemplos de selección natural cuando un factor ambiental ha cambiado con excepcional rapidez. Por ejemplo, hace más de un siglo, la corteza de todos los abedules era casi blanca, lo cual permitía a las polillas de color claro confundirse con su medio ambiente. En su lucha para sobrevivir, proliferaron en torno a los árboles cuya corteza las tornaba casi invisibles. Sus parientes de color más oscuro carecían de esta ventaja competitiva porque contrastaban con la corteza blanca y eran presa fácil para los pájaros que frecuentaban aquella región. Pero a principios del siglo actual, la corteza de los abedules próximos a algunas ciudades industriales se ensució con el hollín de la Revolución Industrial. Este cambio del medio ambiente — rápido según los patrones de la naturaleza — eliminó la ventaja de que gozaban las polillas de color más claro. El resultado es que hoy quedan muy pocas polillas de color claro, por lo menos cerca de las áreas industrializadas; en cambio, las polillas grisáceas poseen ahora la ventaja del camuflaje, por lo que pueden prosperar, aparearse en paz y reproducirse libremente. Este es un ejemplo de cómo sencillas variaciones — en este caso, del color — sirven para dirigir la selección natural en un medio cambiante. De hecho, un pequeño cambio fue para algunas polillas una cuestión de vida o muerte.

La mosca común presenta un segundo ejemplo de cómo algunos miembros de una sola especie pueden adaptarse a los cambios ambientales, gozando así de mayores posibilidades de ser naturalmente seleccionados para la supervivencia. En un principio, el insecticida DDT fue efectivo para matar moscas; pocas pudieron adaptarse al repentino cambio ambiental causado en el aire por el insecticida químico. Pero una pequeña minoría consiguió sobrevivir porque poseían una variación o rasgo casual que les daba inmunidad contra este producto. El cambio ambiental no afectó a estas mutantes, que pudieron reproducirse y transmitir el rasgo favorable a sus descendientes. Al cabo de una década, estos descendientes sobrepasaban en número al tipo original de mosca. Tal es la causa de que el DDT haya perdido efectividad con los años. Ahora la mayoría de moscas comunes han heredado esta resistencia al DDT, y el insecticida ha

dejado de ser útil. No fue el DDT lo que dio esta resistencia a las moscas; sólo creó el cambio ambiental que puso en acción a la selección natural. A fin de sobrevivir como especie, la mosca común tuvo que adaptarse al cambio de ambiente, y las que lo lograron, sobrevivieron.

Estos dos últimos casos son ejemplos de las reacciones evolutivas a cambios ambientales inducidos por seres humanos... todo un nuevo aspecto de la evolución, en el que seres tecnológicamente equipados desempeñan el papel de la naturaleza.

A lo largo de dilatados períodos de tiempo, las variaciones casuales en los organismos vivos pueden acumularse. El color del pelo, y de los ojos, el tamaño, la forma, el aspecto y una serie de otras características van cambiando a medida que la naturaleza selecciona para la supervivencia las formas de vida mejor adaptadas al medio ambiente en un momento determinado. Eventualmente, algunas formas de vida llegan a diferir de manera considerable de los miembros de la especie original. De este modo ayuda el medio ambiente a la evolución de una especie nueva.

Los miembros de una especie pueden dispersarse, por ejemplo, a causa de alguna modificación física del medio, como un río que cambia de ruta y se desvía hacia una región habitada por una especie de mariposas. Si el río es lo bastante ancho como para actuar de barrera física imposible de cruzar, las mariposas de un lado no podrían aparearse con las del otro lado. Las dos poblaciones de mariposas quedarían aisladas una de otra, y al cabo de un largo período de tiempo podrían llegar a ser considerablemente distintas. Si la barrera fuese eliminada — si el río se secara, por ejemplo —, las dos poblaciones podrían volver a mezclarse. Pero si la separación había sido lo bastante larga, les resultaría imposible cruzarse, ya que se trataría de dos nuevas especies de mariposas donde antes sólo existía una. Cada nueva especie ocuparía su propio hueco, y coexistirían pacíficamente en el nuevo medio.

Los trastornos ambientales de esta índole suelen provocar la transformación de una sola especie en dos o más especies. Conocido como proceso de evolución de las especies, este mecanismo preside la diversificación de todos los organismos vivientes.

Consideremos un caso real que tiene como escenario la garganta erosionada del Gran Cañón del Colorado. Dos diferentes poblaciones de ardillas viven en los bordes norte y sur de la gigantesca garganta; las ardillas Kabib, del borde norte, tienen vientres negros y colas blancas, mientras que las ardillas Albert del borde sur tienen vientres blancos y colas grises. Ambas po-



blaciones se alimentan de la corteza de los pinos que sólo crecen en las altiplanicies más elevadas. En la actualidad están separadas, y seguramente lo han estado durante miles de años, por el ambiente seco e intensamente cálido del cañón. Pero tienen tantas similitudes que no parece arriesgado suponer que sus antepasados fueron en un tiempo miembros de la misma especie.

Hay muchos otros ejemplos de dos o más especies ligeramente distintas que coexisten, aunque claramente aisladas, y parecen compartir una herencia común. Los biólogos encuentran casos de estos todos los días, incluyendo a miembros de especies que ni siquiera están separadas por una barrera física, pero que por una u otra razón nunca se cruzan.

¿Qué es lo que altera los organismos vivos hasta el punto de que los miembros de una sola especie sean incapaces de cruzarse? Básicamente, el culpable es el microscópico gene, porque es el código genético el que dicta cómo han de reproducirse las formas de vida. El tema de la genética, cuyo pionero fue hace más o menos un siglo el monje austríaco Gregor Mendel, es más complejo de lo que incluso él pudo imaginarse. Es probable que el propio Darwin se hubiese sorprendido al conocer las raíces microscópicas de la evolución biológica tal como hoy la conocemos: una síntesis moderna de las ideas de Darwin y Mendel, calificada a menudo de neodarwinismo.

Pero, ¿qué causa las alteraciones genéticas? ¿Qué factores contribuyen a las similitudes y diferencias de los organismos? En resumen, ¿cuál es el origen de las múltiples variaciones observadas en el mundo viviente?

El error hereditario es un factor importante que promueve la evolución de los organismos vivos; de hecho, es un requisito para el cambio evolutivo. Observen que decimos *error* hereditario, no la herencia en sí, que es un agente de continuidad, no de cambio. La herencia es el fenómeno biológico que asegura la preservación de ciertos rasgos en futuras generaciones de una especie. De otro modo, los procesos básicos de la vida y los órganos corporales de cada organismo que llegara al mundo tendrían que ser creados a partir de los primeros principios. Normalmente, las instrucciones codificadas químicamente de las moléculas del ADN permiten que las células se dupliquen de manera impecable millones de veces. Pero de vez en cuando se producen errores a nivel microscópico. Ni siquiera los genes son inmutables. Todo cambia.

Por razones no del todo comprendidas, una molécula del ADN puede prescindir de una de sus bases durante la duplicación. O puede adquirir una más. Una sola base puede también transformarse de repente en otro tipo de base. Incluso errores tan mínimos en el proceso de duplicación de la molécula del ADN significan que el mensaje genético contenido en dicha molécula para esa determinada célula ha sufrido un cambio. Éste no necesita ser grande; incluso una alteración de una base nucleótida entre millones distribuidas a lo largo de una molécula del ADN puede introducir una marcada diferencia en el código genético. Esto es causa, a su vez, de que en la célula se sintetice una proteína ligeramente modificada. Y el error se perpetúa, extendiéndose a todas las generaciones subsiguientes de células que contengan ese mismo ADN.

Los cambios microscópicos en el mensaje genético, llamados mutaciones, pueden afectar a la progenie de diversas maneras. A veces el efecto es pequeño, y los organismos recién nacidos apenas presentan diferencias. Otras, en cambio, las mutaciones pueden afectar una parte más importante de una molécula del ADN, introduciendo un cambio considerable en la estructura de un organismo. Y otras veces, una sola mutación puede deteriorar una molécula del ADN hasta el punto de causar la muerte de la célula individual, e incluso del organismo entero.

Las mutaciones causan diferencias en el color del pelo y de los ojos, en la estatura, en la longitud de los dedos, en la textura de la piel, en la estructura interna, en las dotes individuales y en muchas otras características de una población de formas de vida de cualquier especie determinada. Las mutaciones genéticas

pueden modificar virtualmente todos los aspectos de la vida de un organismo. Semejantes mutaciones producen una variedad infinita de nuevas clases de moléculas del ADN.

No todas las mutaciones son perjudiciales. Es cierto que la mayoría crea características inferiores a las de la generación anterior, especialmente en muchos de los organismos actuales, altamente evolucionados y exquisitamente adaptados. Pero algunas mutaciones son favorables y sirven para mejorar la vida de un individuo. Además, las generaciones siguientes pueden heredarlas, con lo que la vida se hace más agradable para los miembros de dicha especie. Las mutaciones beneficiosas actúan como el motor de la evolución, dirigiendo las formas de vida hacia una mejor adaptación a los constantes cambios del medio ambiente.

¿A qué se deben las mutaciones de los genes? ¿Por qué algunas moléculas del ADN se duplican a veces de modo diferente, aunque se hayan duplicado con exactitud en millones e incluso miles de millones de previas divisiones de células? Seamos francos: las causas exactas no se conocen porque al parecer se trata de un hecho fortuito e indiscriminado. Los biólogos han realizado experimentos de laboratorio con células y han logrado aumentar el número de mutaciones por medios artificiales, ayudando así a desentrañar las razones últimas para el cambio genético. Hasta la fecha, los resultados revelan que la forma más fácil de incrementar las mutaciones de genes es tratar las células reproductoras con agentes externos.

Tres de los agentes inductores más importantes revelados en las últimas décadas son la temperatura, las sustancias químicas y la radiación. Cuando las células son sometidas al calor o tratadas con gases neurotóxicos generados industrialmente o drogas químicas, las mutaciones se incrementan de manera sensible. Además, la radiación ultravioleta y de rayos X parecen ser causas muy notables de mutaciones genéticas. Esta radiación ha estado presente en la Tierra, en una u otra forma, desde el origen de nuestro planeta. Tanto los elementos radiactivos incrustados en rocas como los rayos cósmicos que bombardean la Tierra desde el espacio exterior y la radiación ultravioleta solar que llega hasta la superficie terrestre sirven para probar que la vida ha evolucionado en un medio lleno de radiación.

En general, no hay nada malo en vivir inmerso en la radiación. Es probable que ni nosotros ni otras formas de vida estuviéramos aquí si el motor de la evolución no hubiese acelerado el cambio; sin radiación, ni la propia vida habría progresado tal ves más allá de los primitivos e inconscientes organismos unicelulares que flotaban en el barro oceánico. Sin embargo, es lícito preocuparse por el hecho de que algunos inventos humanos como las bombas atómicas, los reactores nucleares y ciertos aparatos

clínicos también emiten radiación. Dosis intensas de radiación pueden matar instantáneamente, mientras dosis más sutiles causan cambios en el ciclo reproductor que son heredados por las generaciones futuras. No está demostrado que semejantes mutaciones inducidas por los humanos sean perjudiciales en todos los casos, pero, al carecer de pruebas en sentido contrario, lo más aconsejable es abrigar cierto grado de escepticismo.

No deberíamos poner en peligro el refinado trabajo de varios miles de millones de años de evolución orgánica, porque la larga serie de cambios accidentales representados por la evolución no podrá repetirse jamás.

Hace cien años, el concepto de la evolución biológica era intelectual y moralmente escandaloso. Pocos lo aceptaban; incluso muchos científicos de finales del siglo XIX se negaron a darle el visto bueno. El problema no era realmente la idea de la evolución; la evolución es un hecho, y la gente del siglo pasado lo sabía. Entonces ya abundaban los fósiles, y hacía siglos que los agricultores cultivaban los campos y criaban ganado del mejor modo posible para obtener cosechas y razas sanas y resistentes. El verdadero problema residía en que a la gente le molestaba oír que los seres humanos tenían algo en común con un puñado de monos. En las hipótesis que implican a seres humanos, la vanidad suele manifestarse como una fuerza incontenible. Y es seguramente a causa de esta misma vanidad que algunos sectores de nuestras civilización del siglo XX aún se resisten a aceptar los principios básicos de la evolución biológica.

Los científicos, gracias a descubrimientos debidos a los fósiles y a estudios de comportamiento realizados en los últimos años, saben actualmente que, entre odas las especies de vida existentes ahora en la Tierra, el chimpancé y el gorila son nuestros parientes más próximos. Los seres humanos no descienden del mono, como piensan algunos; la ciencia moderna estipula que los monos y los seres humanos tienen algunas características en común y, por consiguiente, un antepasado común. Ahora no podríamos identificar a este antepasado entre los seres vivientes que pueblan la Tierra, porque los genes y el medio ambiente cambian en el curso de millones de años, pero es seguro que dicho antepasado figura entre los fósiles.

Para descubrir a nuestros antepasados más próximos y averiguar así los caminos de la evolución biológica relativamente reciente, los científicos dependen en alto grado de los fósiles. Dentaduras y cráneos forman la mayor parte de los fósiles descubiertos desde que los arqueólogos empezaron a cavar la tierra en busca de objetos hace dos o tres siglos. Los dientes son la

parte más resistente de cualquier forma de vida a causa de su esmalte extraordinariamente duro. Los cráneos son más fáciles de descubrir que los huesos de brazos y piernas, sobre todo porque éstos pueden confundirse con los palos y ramas que suele haber en el suelo. Un estudio cuidadoso de estos y otros fragmentos óseos ha permitido a los investigadores llegar a un acuerdo sobre la línea ascendente que culmina en los homínidos. La idea es la siguiente:

A principios del Cenozoico, hace algo menos de cien millones de años, unos mamíferos parecidos a ardillas buscaban maneras de incrementar sus posibilidades de supervivencia en un medio ambiente bastante hostil. Se trataba de seres que se alimentaban de insectos y vivían principalmente en el suelo. Los dinosaurios ya habían desaparecido, pero la vida en el suelo aún presentaba problemas para estos mamíferos primitivos. Los fósiles indican la existencia de animales relativamente grandes que sin duda sobrevivían a su costa. Pero por fortuna, las mutaciones esporádicas y un medio que cambiaba constantemente ofrecieron finalmente a algunos de estos pequeños mamíferos la posibilidad de cambiar sus pautas de vida.

En este punto, muchas especies de mamíferos invadieron los árboles. Sin duda buscaban más alimento, además de intentar escapar de la violenta competencia que prevalecía en el suelo. Algunas especies encontraron en los árboles un medio aún más hostil y acabaron extinguiéndose. Otras se sintieron a gusto en el nuevo hábitat y sobrevivieron. Unas pocas, como las tupayas del sudeste de Asia, continúan viviendo en la actualidad. Sus características resultaron ser adaptables a la vida en los árboles. De hecho, los árboles constituían un ambiente totalmente nuevo que ayudó a transformar a estos mamíferos que vivían en el suelo y se alimentaban de insectos en prosimios cuya existencia transcurría entre las ramas y se alimentaban de plátanos. Estos prosimios son los miembros menos avanzados de los primates, una categoría zoológica a la que pertenecen tanto el mono como el hombre.

Los fósiles sugieren refinamientos casi infinitos mientras cada uno de los primeros prosimios más adaptables se hacía con el mejor de los medios disponibles. Con el tiempo, tras generaciones y más generaciones de selección natural, las garras se transformaron gradualmente en manos, y las uñas gruesas y romas en dedos flexibles. El pulgar oponible tomó forma cuando el medio exigió su prominencia como herramienta perfecta para maniobrar entre las ramas. Recordemos que no se trata de cambios anatómicos producidos durante la vida de un individuo, sino



cambios genéticos que se desarrollaron en el curso de millones de años. Algunas mutaciones favorables dieron eventualmente a estos prosimios un buen equilibrio, buena vista y manos y dedos hábiles, todo lo cual incrementó sus posibilidades de supervivencia en el medio arbóreo recién descubierto. Los mejor adaptados a este medio pudieron reproducirse con más eficacia, transmitiendo estos rasgos favorables a las generaciones siguientes. Algunos miembros de la especie superaban a los otros en saltar, balancearse, agarrarse y procurarse comida. El resultado, nuevamente documentado por los fósiles, fue una especialización general que culminó en la aparición de numerosas especies nuevas que habitaban los árboles.

El desarrollo de una vista fina fue una evolución particularmente importante. Al fin y al cabo, los árboles son tridimensionales, a diferencia del suelo, que sólo tiene dos dimensiones. El rasgo favorable del olfato en el suelo cedió el paso a la buena vista en los árboles. Los fósiles revelan que en el curso de millones de años y de incontables generaciones las mutaciones fueron llevando gradualmente los ojos de estos pobladores de árboles hacia la parte frontal de la cabeza, dándoles con ello una visión binocular y estereóscopica. Con los ojos a los lados de la

cabeza se tienen dos campos visuales independientes, como veríamos si apretáramos la nariz y la frente contra el borde de una puerta abierta. El acortamiento gradual del hocico y el lento desplazamiento de los ojos hacia delante ofreció a algunos primitivos prosimios un campo visual superpuesto y por consiguiente una visión más perfeccionada. La percepción de la profundidad, sobre todo, les permitió calcular la distancia entre las ramas. Es obvio que estos remotos antepasados de hace unos cincuenta millones de años disfrutaban de claras ventajas en la lucha por la supervivencia. Se habían convertido en simios. Un nuevo e importante sendero evolutivo acababa de abrirse.

Descubrimientos debidos a los fósiles revelan asimismo que algunas especies de simios aumentaron gradualmente de tamaño. Tampoco este cambio se produjo en una sola generación de una especie determinada, sino gracias a esporádicas mutaciones de sus moléculas del ADN, que a través de numerosísimas generaciones dieron a los simios de mayor tamaño algunas ventajas en la competición por la supervivencia. Los machos más agresivos y de mayor corpulencia, por ejemplo, gozan de una clara superioridad sobre los de menor tamaño en la competencia sexual por las hembras. Además, los cuerpos voluminosos suelen significar una protección adicional contra los depredadores.

Por otra parte, un gran tamaño no es siempre una ventaja. El volumen también tiene sus inconvenientes. A los simios de gran tamaño, por ejemplo, les resulta más difícil ocultarse, y además necesitan más alimento para sobrevivir. Todos los cambios genéticos conllevan ventajas e inconvenientes; y la oportunidad para sobrevivir sólo existe cuando aquellas superan a éstos.

La capacidad de agarrar con fuerza una rama mientras se extiende simultáneamente un brazo para alcanzar la comida fue sin duda una gran ventaja en aquellos tiempos. Las especies incapaces de agarrarse con la habilidad suficiente para no caer al vacío, murieron y acabaron extinguiéndose. Las especies cuyos brazos no eran lo bastante largos como para alcanzar la comida murieron de hambre y se extinguieron. La ventaja clara era de los prosimios capaces de coordinar el acto de agarrarse con el de coger algo simultáneamente. Como es natural, tampoco estaba de más ser lo bastante listo como para repeler los ataques de un sinnúmero de enemigos. Así el árbol de hace cuarenta millones de años se convirtió en un medio bastante cómodo para algunas especies de simios. Estos animales bien adaptados podrían haber permanecido indefinidamente en los árboles de no haber surgido un problema. Por fortuna para nosotros, el cambio volvió a hacer acto de presencia; de lo contrario, no estaríamos aquí.

La vida regalada en los árboles fue causa de un problema fundamental. Los monos ancestrales de hace cuarenta millones de años estaban tan cómodos y tan acostumbrados a su medio arbóreo que se multiplicaron con más rapidez que muchas otras especies establecidas en medios más hostiles. El tiempo que no se dedica a la supervivencia puede pasarse muy agradablemente dedicándose a la reproducción. El resultado fue probablemente una explosión demográfica, el tipo de crisis que es inevitablemente seguida por una escasez de alimentos. Por lo tanto, sólo sobrevivieron los simios que utilizaron su limitado ingenio para descubrir nuevas fuentes alimentarias. Esto significó para algunos abandonar los árboles y volver una vez más al suelo.

Algunas especies de monos permanecieron en los árboles y, con el tiempo, la mayoría se extinguieron, aunque subsisten actualmente varias bajo distintas formas. Los babuinos, gibones, orangutanes y muchos monos modernos que viven en los árboles descienden de aquellos que prefirieron permanecer en su medio arbóreo. Los simios que bajaron de los árboles inauguraron un nuevo sendero evolutivo, que fue el que condujo hacia la especie humana.

A primera vista parece absurdo que los prosimios treparan a los árboles para vivir en ellos hace setenta millones de años si algunos de sus descendientes tendrían que abandonar aquellos árboles varias decenas de millones de años después. Pero mientras residían entre el follaje experimentaron un cambio enormemente importante: evolucionaron y se adaptaron a un medio muy especial. Cuando los simios volvieron al suelo estaban equipados con cualidades que seguramente no habrían sido seleccionadas de modo natural si no hubieran subido a los árboles. Con su destreza manual y visión binocular — entre otras ventajas — estaban mucho más avanzados que cualquier otro tipo de vida existente entonces en el suelo.

ÉPOCA SEXTA

La cultura

DE LA INTELIGENCIA A LA TECNOLOGÍA



miles de millones de años

Uno de los aspectos más notables de la vida es su conciencia del entorno. A diferencia de la materia inorgánica, la vida puede recibir impresiones del mundo exterior y responder a ellas. A través de los diversos sentidos de la vida —oído, vista, olfato, tacto y gusto—, los organismos adquieren y archivan enormes cantidades de información. La capacidad de conseguirlo en mayor o menor grado depende mucho de su «complejidad». Los organismos manifiestan esta complejidad en términos de una exquisita pieza de materia: el cerebro. El cerebro es el centro distribuidor de todo el comportamiento.

Mientras leemos estas palabras, la materia de nuestro cerebro está llena de actividad eléctrica. En silencio, con gran eficacia, millones de células nerviosas pasan mensajes de un lado a otro en el interior de nuestro cerebro. Guían nuestros ojos a lo largo de esta línea. Captan rápidamente las formas de las letras. Y, después de recurrir a la memoria para su referencia, nos permiten reconocer las palabras.

Las células nerviosas intercambian constantemente señales dentro de nuestros cerebros, ordenando latir a nuestros corazones, bombear a nuestros pulmones y prepararse para volver esta página a nuestras manos. El sistema nervioso del cuerpo, del cual el cerebro es la parte principal, controla toda la actividad mental y física. De hecho, todos los pensamientos, sentimientos o acciones empiezan en el cerebro. Todo el comportamiento humano está bajo su control.

Y lo más interesante es que estas silenciosas actividades que se desarrollan en nuestra cabeza nos facilitan la conciencia de

que ahora estamos leyendo sobre ellas. Asombrosamente, el cerebro puede contemplarse a sí mismo.

El cerebro humano es la pieza de materia más compleja que se conoce. Es la creación más tentadora, inteligente y versátil de la naturaleza... el ejemplo definitivo del grado de evolución alcanzado por la materia en el Universo *conocido*.

La ameba unicelular es la forma de vida más primitiva que se conoce en el mundo actual. A medio camino, como quien dice, entre un átomo y un ser humano, tiene escasa percepción y coordinación. En general sólo responde en el punto estimulado, comunicando lentamente la información al resto del cuerpo. Mientras las amebas han desarrollado un tosco sistema nervioso, los organismos vivos más ágiles necesitan una comunicación interior más rápida.

Otros seres unicelulares han conseguido desarrollar primitivos sistemas de intercomunicación. Por ejemplo, el microscópico paramecio posee una serie de pelos semejantes a remos que le permiten moverse velozmente en el agua. Los «remos» han de actuar de forma coordinada, porque si funcionaran independientemente, el paramecio no podría avanzar. Están regulados por nervios microscópicos que responden a una sustancia química emitida dentro de la célula. De este modo pueden transmitirse mensajes con rapidez y precisión de una parte a otra de la célula.

Es obvio que el paramecio tiene una «inteligencia» superior a la de la ameba. Posee mejor coordinación y una especie de memoria. La ameba busca alimento introduciéndose entre las algas; si no lo encuentra, continúa buscando en la misma alga, aunque ésta no contiene un alimento satisfactorio para ella. La ameba carece de memoria. En cambio, el paramecio, si no encuentra comida cerca de un alga, retrocede y busca recursos en otra dirección; retiene momentáneamente trazas de experiencia.

Comparado con la ameba, el paramecio es un genio. Pero es un genio que opera en un mundo de sólo unos milímetros de extensión. No tiene conciencia de que haya nada más allá. Ningún organismo unicelular puede ser más inteligente, porque no puede seguir desarrollándose.

Pese a las complejidades bioquímicas de la célula, individual, éste sólo posee la inteligencia más primitiva. Para aumentar su inteligencia —para desarrollar un intrincado sistema nervioso—, la célula necesitaría complicados órganos sensoriales que la informaran, así como músculos desarrollados para poder cumplir sus instrucciones. ¿Por qué no existen, entonces, células mayores que gocen de estos lujos adicionales, equipadas tal vez con manos, ojos y cerebro en miniatura? La respuesta es que las cé-

lulas aisladas no pueden ser mucho mayores que los organismos de 0,0001 centímetros descritos más arriba. Si lo intentaran, sus áreas de superficie aumentarían al cuadrado de su tamaño (1,4,9,16...) mientras sus masas, que deben ser alimentadas a través de las membranas de las células, aumentarían al cubo de su tamaño (1,8,27,64...). De modo que las células no pueden ser mayores porque se morirían de hambre. La inteligencia básica de las formas de vida unicelular es, pues, limitada; su tamaño físico les impide desarrollar los numerosos y complejos órganos necesarios para una inteligencia más elevada. No cabe duda de que las mutaciones les ayudaron a intentar todos los medios posibles para aumentar de tamaño durante los últimos tres mil millones de años, pero todo fue en vano.

El camino a una mayor inteligencia requiere muchas células. Una acumulación casual de muchas células independientes no será, sin embargo, efectiva; agrupaciones de un millón de células independientes no son más inteligentes que una célula sola. Consideremos una esponja, por ejemplo, no muy diferente de la que usamos en la bañera. Aunque la esponja es claramente multicelular, la mayoría de los millones de células que contiene actúan independientemente. La esponja no tiene un sistema nervioso central, por lo que no es mucho más inteligente que la ameba. Por alguna razón, no ha conseguido aprovecharse de su multicelularidad, y por lo tanto, no ha producido formas de vida más elevada. La esponja es un ejemplo de forma de vida que llegó hace muchísimo tiempo al término de su evolución.

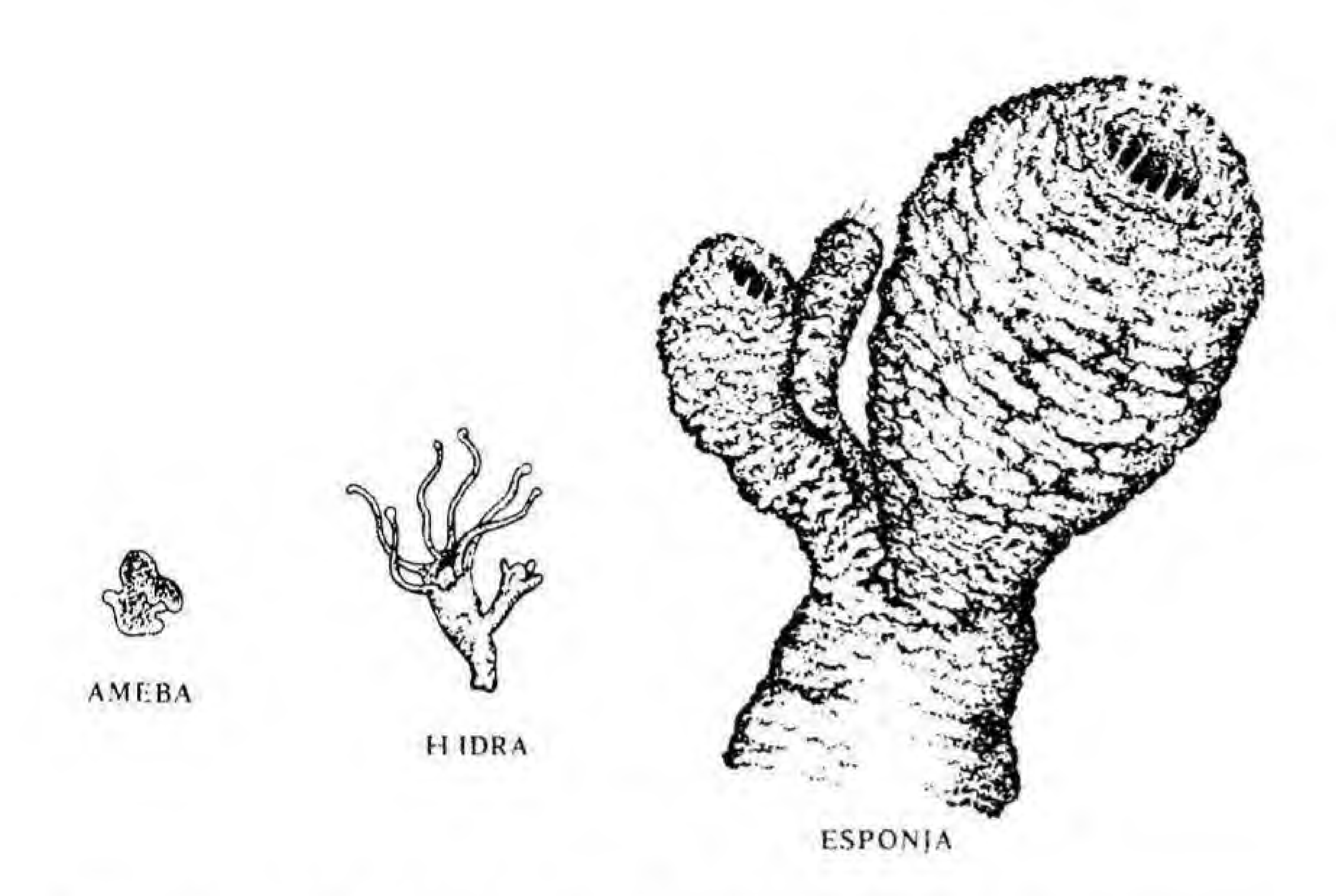
Era precisa una mutación favorable que permitiera a una acumulación de muchas células trabajar juntas en comunidad. Los organismos multicelulares e interactivos tienen algunas ventajas obvias, una de las cuales es soslayar la dificultad superficie-volumen mencionada más arriba. Y aún más importante: grupos de células en el interior de un organismo multicelular pueden desarrollar funciones especializadas. Un grupo de células puede ser altamente sensible a los alimentos; otro, más eficiente en el aporte de oxígeno, otro, tener resistentes entidades musculares o epidermis protectoras. El resultado neto es que cada grupo de células de un organismo multicelular es más hábil en una capacidad y menos en el resto. Por consiguiente, la inteligencia total de un organismo se ve enormemente incrementada cuando las células trabajan en equipo y son más capaces, no sólo de protegerse de los depredadores, sino también de obtener el alimento necesario para la supervivencia. Estos fueron los primeros pasos hacia la sociedad simbiótica.

El animal llamado hidra es un buen ejemplo de organismo multicelular que evolucionó hasta lograr una inteligencia considerable. No mayor que un palillo, la hidra actual semeja un tallo de apio, cerrado en el extremo inferior y provisto de largos tentáculos en el superior. A diferencia de cualquier esponja, la hidra puede mover todo el cuerpo de manera coordinada para evitar un peligro, buscar alimento y otras cosas. En resumen, las células de la hidra pueden comunicarse entre sí. Y la comunicación es la esencia de la inteligencia organizada.

Es probable que las células capaces de comunicarse —las nerviosas— se formaran originalmente cerca de la superficie de animales multicelulares como la hidra o, más realísticamente, como progenitores de la hidra. Al estar al descubierto, estas células tenían todas las oportunidades para elegir su medio, pero también eran más vulnerables. Así, las mutaciones y la selección natural favorecieron a los antepasados de la hidra cuyas células nerviosas se hallaban profundamente implantadas. Estas células se retiraron gradualmene hacia el interior de los organismos, pero mantuvieron su relación con el medio desarrollando unos tentáculos que llegaban a la superficie e incluso la sobrepasaban. Estos tentáculos en miniatura parecidos a un pulpo son las dendritas de las modernas neuronas, células especiales que comunican información en los seres inteligentes.

A medida que progresaba la evolución, el grueso de las neuronas se retiraba a una profundidad cada vez mayor en el interior de los organismos multicelulares, hasta que quedaron enterradas y formaron una entidad coagulada de células nerviosas, el primero y más importante paso en el desarrollo de un sistema nervioso central. La formación de núcleos de neuronas fue uno de los grandes hitos de la evolución. Una vez cruzada esta barrera, hace unos mil millones de años, nuestros antepasados de la familia de la hidra, así como otros organismos complejos como ellos, continuaron evolucionando sin descanso hasta procrear a todas las formas de vida animal inteligente de la Tierra, incluyendo a los seres humanos.

¿Qué dicen los fósiles sobre la evolución del cerebro? Revelan un claro desarrollo evolutivo del sistema nervioso central en organismos que se ramificaron en todas direcciones, progresando constantemente hacia una mayor compejidad. La mayoría de las ramas, sin embargo, representa a organismos que o bien se extinguieron hace mucho tiempo o que sólo sobrevivieron como terminales. Al parecer, en algún punto de su desarrollo tropezaron con algún obstáculo biológico insuperable. Algunos de los que sobreviven sin evolucionar en ningún sentido son la ameba, el paramecio, la esponja y la hidra, así como los gusanos de todas clases. Se trata de los invertebrados, organismos sin esqueleto, muchos de los cuales son diestros y habilidosos en su



propio dominio. Las arañas, por ejemplo, están maravillosamente dotadas en su propio medio; sus sistemas nerviosos son complejos y efectivos y sus órganos sensoriales aún más variados y sutiles. También las abejas, avispas, hormigas y polillas tienen cuerpos soberbios para desenvolverse en su mundo. Algunas, en especial las abejas y hormigas, tienen incluso organizaciones sociales complejas con una comunicación simbólica sencilla.

Sin embargo, todos estos animales invertebrados han llegado a terminales evolutivos. Están atrapados en un ciclo interminable de rutinas cotidianas perfeccionadas. Arañas fosilizadas de hace cien millones de años muestran poca variación con respecto a sus descendientes modernos. Las abejas de esos arbustos, las arañas de aquel cobertizo son, en cierto modo, fósiles vivientes.

Los invertebrados son éxitos y fracasos al mismo tiempo. Están fabulosamente dotados para su reducido medio. El tábano, por ejemplo, es considerado el animal más veloz; la pulga puede saltar una altura cien veces mayor que la propia. Son éxitos, no cabe duda, porque los invertebrados dominaron la Tierra durante casi quinientos millones de años. Pero también son fracasos, porque no consiguieron desarrollar la columna vertebral tan conspicua en los peces y en el hombre; los huesos que forman la espina dorsal y el cráneo.

Los vertebrados son un subproducto del vasto y populoso mundo de los invertebrados. Los seres humanos y demás vertebrados (peces, reptiles y mamíferos) son una excepción del gran fracaso de los invertebrados.

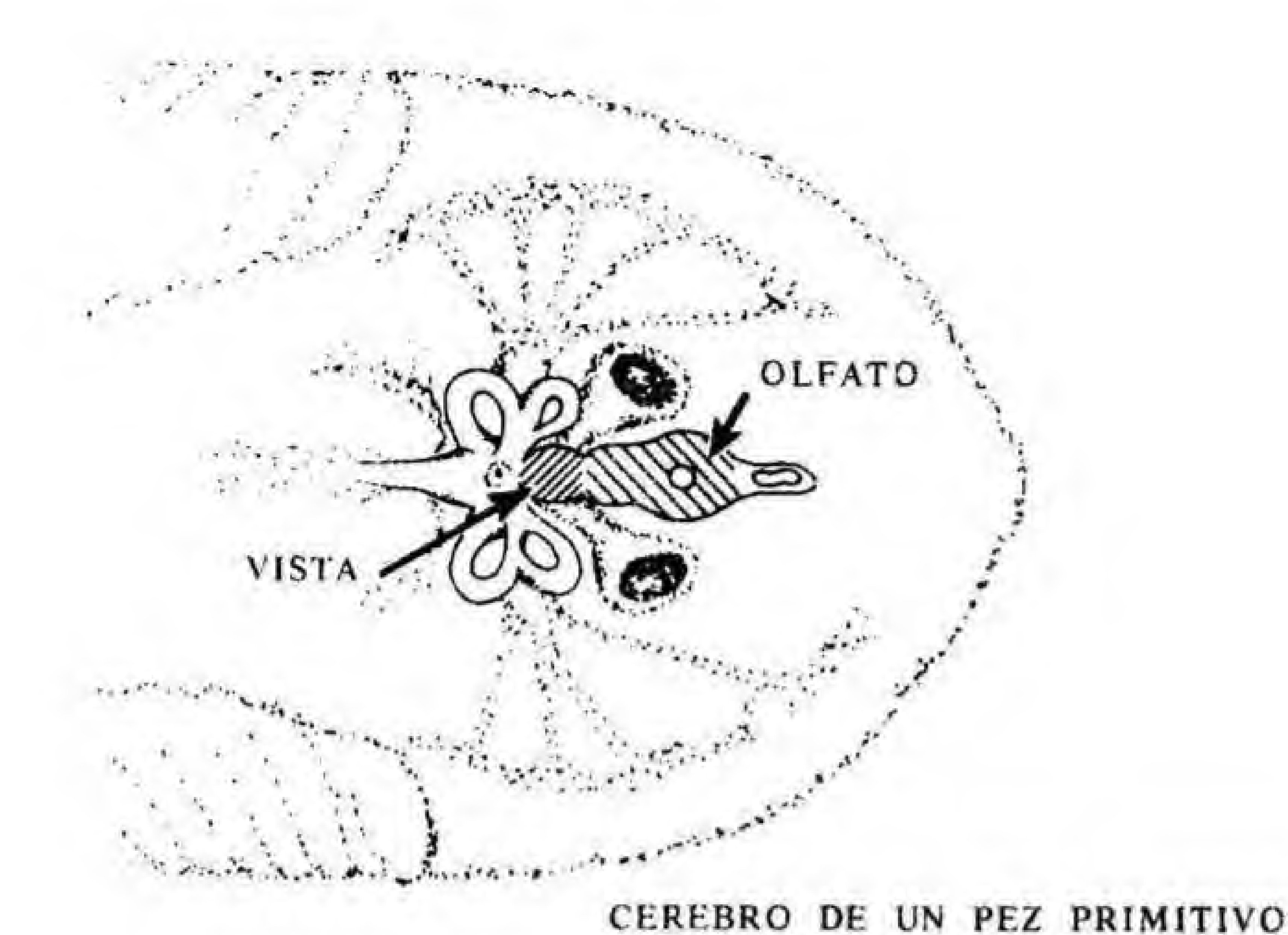
Como seres humanos, damos por sentada la existencia del cerebro. Pero la vasta mayoría de animales son invertebrados, por lo que no pueden tener un verdadero cerebro ni un sistema nervioso central. No pueden ser creativos, ni aventureros, ni visionarios. El cerebro es la excepción, no la regla.

La característica principal de los vertebrados es su sistema nervioso central. Incluso así, muchos de ellos fueron al parecer incapaces de utilizar los órganos sensoriales y motores a pleno rendimiento. Una gran cantidad de peces, anfibios y reptiles, incluyendo las versiones actuales de muchos pájaros, lagartos, serpientes, cocodrilos, tortugas y otros vertebrados, se estacionaron hace mucho tiempo. Buena parte de ellos se extinguieron y los supervivientes no han sido capaces de establecer una división de autoridad entre las neuronas de la «vista» y del «olfato».

Gracias a los fósiles han podido reconstruirse con detalle los cráneos de peces primitivos. Estos peces vivieron hace varios centenares de millones de años y se cuentan entre los vertebrados más simplificados que se conocen. Aunque bastante toscos, sus cerebros contenían todos los elementos esenciales presentes en los peces actuales y en los seres humanos. El agrupamiento de órganos olfativos produjo un bulto en el hocico que fue el precursor de los hemisferios cerebrales mucho mayores de los seres humanos. De modo similar, sus ojos crearon otro bulto algo más hacia atrás, precursor de nuestro lóbulo occipital, en el que «vemos» imágenes proyectadas en la parte posterior de nuestro cerebro. Los órganos en línea lateral también se ramificaron hacia el lado, siendo precursores de nuestro cerebelo, que es donde se coordina el movimiento corporal. Estos antiguos órganos sensoriales, aunque incapaces de rivalizar con los de algunos invertebrados actuales, se empleaban con mayor eficiencia debido a su conexión con un sistema nervioso central unificado.

El desarrollo de órganos sensoriales especializados, junto con la integración de dichos órganos en el cerebro centralizado, contribuyó al dominio intelectual de los vertebrados sobre los invertebrados.

La vista desempeñó sin duda un papel importante en el desarrollo de estos primeros vertebrados, como demuestran los fósiles al revelar la evolución con el tiempo de un cerebro visual relativamente grande. Las mutaciones se limitaron a dar una ventaja a ciertas especies de peces, permitiéndoles utilizar una visión incrementada para moverse, sobrevivir y procrear mejor en el agua. Sin embargo, el sentido de la vista no fue el único en



CEREBRO DE UN PEZ PRIMITIVO

mejorar; también el del olfato se desarrolló mucho en la vida terrestre de hace varios centenares de millones de años.

Es interesante observar que cuando los anfibios se trasladaron del mar a tierra firme, el caudal de datos visuales abrumó probablemente incluso al complejo cerebro de estos vertebrados ya bastante avanzados. En cambio, el sentido del olfato estaba todavía al alcance de semejante cerebro. Para estos primeros anfibios, el olfato era más práctico que la vista. En realidad, el registro de fósiles indica que el lóbulo occipital se encogió, mientras los hemisferios cerebrales se ensancharon con el paso del tiempo. El sentido de la vista recuperó gradualmente su utilidad a medida que el cerebro de los mamíferos aumentaba de tamaño en virtud de continuadas mutaciones y de la selección natural; la multitud de imágenes no acuáticas ya no saturaba los ojos anteriormente oceánicos. Los cerebros de mayor tamaño de los mamíferos pudieron entonces abarcar el mundo visual y el auditivo. Estos anfibios, con sus cerebros más complejos, ya estaban mejor equipados para sobrevivir en un cambiante medio terrestre.

Los hemisferios cerebrales humanos, mucho mayores, se derivan del antiguo cerebro olfativo, pero el predominio de este sentido no tardó en ser rebasado por la vista, el oído y otras sensaciones generales.

El último paso en la evolución del cerebro ocurrió en los mamíferos. Una vez más, existían muchos terminales evolutivos,

mutaciones que no daban grandes ventajas a una determinada especie. No obstante, otras mutaciones proporcionaron auténticas ventajas a otros organismos, ofreciéndoles así mejores oportunidades en la perpetua lucha por la supervivencia.

Ya hemos observado cómo las mutaciones favorables causaron en el curso de millones de años e incontables generaciones el desarrollo en algunos mamíferos de brazos más largos y patas apropiadas para agarrarse, saltar, balancearse y alcanzar los alimentos. Otras mutaciones desplazaron gradualmente los ojos de los primeros prosimios hacia la parte frontal de la cabeza, haciendo así posible la visión binocular y estereoscópica. El acortamiento del hocico y el desplazamiento de los ojos hacia delante facilitó a los primeros primates un campo de visión superpuesta y por lo tanto tridimensional. El posterior desarrollo de brazos más largos y manos más hábiles se combinó con una visión más precisa para dar a estos antepasados prosimios claras ventajas en la lucha por la supervivencia.

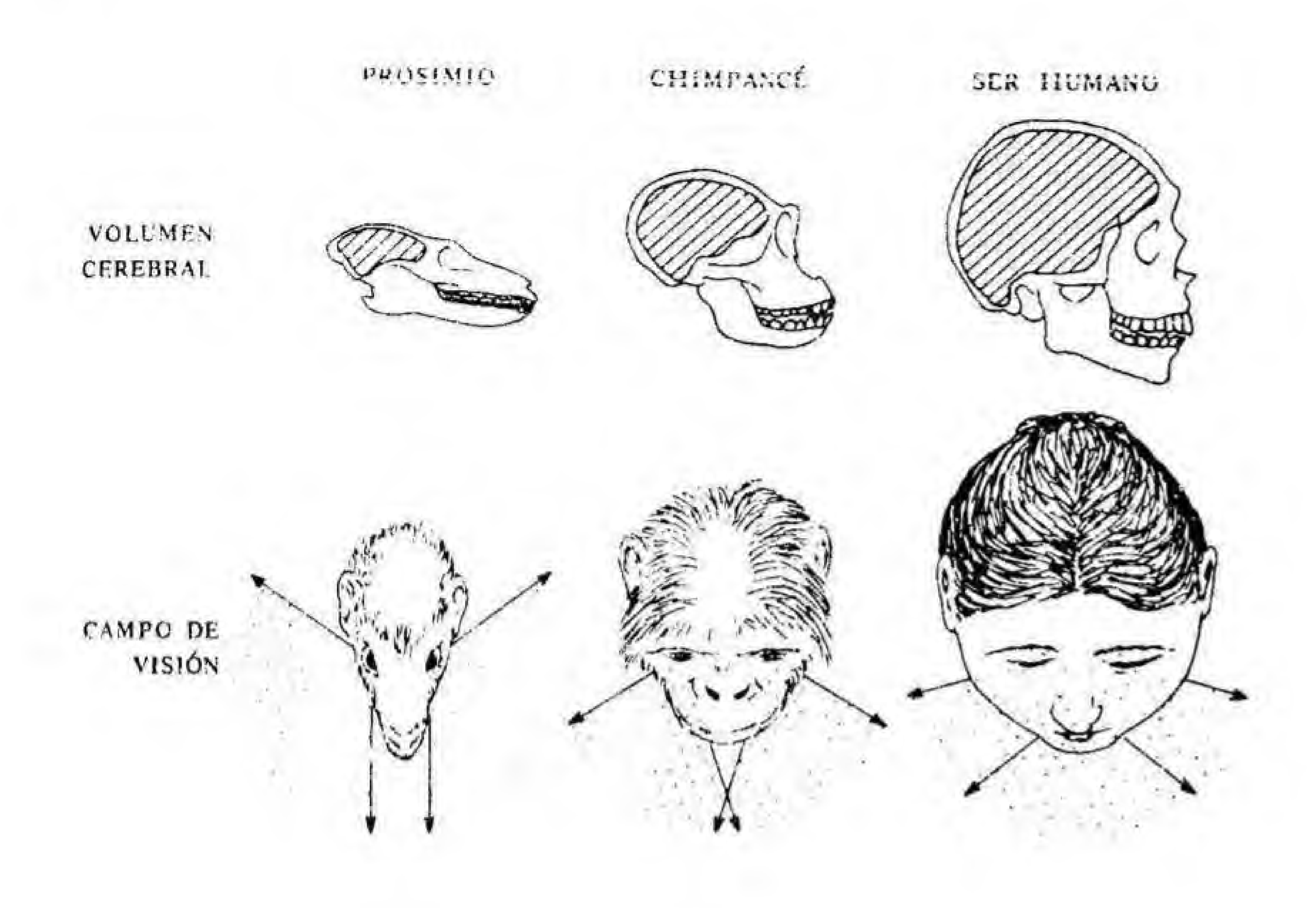
Mientras tanto, el córtex cerebral se agrandó, permitiendo a los mamíferos desarrollar una creciente complejidad de los sentidos. El sistema conjunto ojos-manos-cerebro era una poderosa herramienta no sólo para la supervivencia sino también para el desarrollo de la inteligencia. La culminación son las habilidades manuales aparentemente sin límites del *Homo sapiens.*

¿Qué hay de nosotros? Es natural preguntarse sobre el específico sendero evolutivo que a partir de nuestros lejanos antepasados condujo hasta los seres humanos contemporáneos. ¿De dónde hemos venido? ¿Cómo llegamos hasta lo que somos? ¿Qué circunstancias determinaron la forma decididamente extraña de nuestro cuerpo? ¿Qué factores condujeron al desarrollo de nuestros fabulosos atributos mentales, a nuestra capacidad de hablar con la boca, andar erguidos, construir con nuestras manos y ver con visión binocular?

¿Quiénes somos? No qué es nuestro Sol, nuestro planeta o la propia vida, sino ¿quién o qué son estos seres humanos del siglo XX que habitan la Tierra? Todos nos hacemos estas preguntas en un momento u otro de nuestra vida, ya que se trata de las cuestiones más profundas e interesantes que existen.

Dicho en dos palabras, cada uno de nosotros parece ser el producto de muchas formas de vida ancestrales, un núcleo de genes heredados de todas ellas y formados por un medio ambiente que es en parte nuestro, en parte de nuestros padres, en parte de nuestros abuelos, etcétera.

Si retrocedemos mil años, veremos que cada uno de nosotros ha tenido más de un millón de antepasados, todos vivos al mis-



mo tiempo. Es probable que estuvieran diseminados por casi todo el mundo y vivieran en una gran diversidad de medios. Si retrocedemos otros mil años, veremos que algunos de nuestros antepasados podrían haber sido miembros de la clase dirigente del antiguo Egipto o Babilonia. Pero en su mayoría debieron ser esclavos o campesinos. Es muy probable que no supieran leer ni escribir. Que fueran ignorantes, supersticiosos y crueles... en el mejor de los casos, agricultores primitivos. Pocos de ellos debieron haber tocado un metal o hecho funcionar una rueda. Según los patrones modernos, la mayoría de nuestros antepasados de hace dos mil años eran salvajes. Sobrevivían principalmente gracias a la caza y la recolección. Es difícil imaginarlos como parientes, pero la ciencia moderna insiste en ello. La evolución estipula que llevamos en nuestros cuerpos algunos de sus genes. Partes de nuestros rasgos, formas, deseos y actitudes, así como de nuestros criterios y filosofías, provienen de los genes de nuestros antepasados, a su vez moldeados en parte por el ambiente en que vivían.

Así pues, las respuestas a las cuestiones fundamentales son de índole evolutiva. Son respuestas que nos permiten relacionarnos con toda la humanidad, con todos los organismos vivos. Si

podemos encontrar estas respuestas, tal vez podamos determinar quiénes somos en realidad, por qué caminamos erguidos, construimos herramientas, hablamos de modo coherente, y pensamos, especulamos y mostramos curiosidad a propósito de nosotros mismos y de nuestro Universo.

Hace mucho tiempo, nuestros remotos antepasados no poseían ninguno de estos atributos. No eran humanos, sino seres de cerebro pequeño que poblaban las selvas. De algún modo, dieron origen al hombre. En alguna parte de nuestro pasado ancestral existen vínculos que unieron a seres claramente humanos con seres que no lo eran.

Los fósiles permiten a los científicos esbozar los senderos de la evolución y comprender las finas líneas divisorias que separan a las diversas especies estrechamente emparentadas. Los fósiles de tiempos recientes suelen estar bien conservados, lo cual hace posible que los investigadores documenten la evolución con un grado razonable de seguridad. No es de extrañar que los fósiles más antiguos estén en peores condiciones, a menudo en pedazos y a veces casi irreconocibles. Reunir los pedazos es como resolver un rompecabezas. Tratar de comprender dónde y cuándo encajan los fósiles reconstruidos en la línea de ascendencia evolutiva es otra clase de rompecabezas.

El esfuerzo global para descifrar la genealogía humana suele compararse con la restauración de un mural gigantesco pintado en el curso de millones de años. A la derecha, donde el hombre moderno ha hecho un bosquejo de la escena en tiempos recientes, el mensaje es bastante claro. A la izquierda, el mural está sucio, la pintura se desprende y en general se deteriora. Pintado hace mucho tiempo por nuestros antepasados, tiene la suciedad incrustada y no es fácil restaurarlo para vislumbrar el mensaje. Como en cualquier restauración, el proceso es largo y laborioso, y ha de hacerse muy despacio para no destruir el mural y, por consiguiente, el mensaje.

Los antropólogos y arqueólogos que examinan los fósiles antiguos necesitan mucha paciencia y una mente inquisitiva y libre de prejuicios. El trabajo se parece al de un detective que intenta esclarecer un crimen a partir de unas pocas pistas. Pero aquí la solución significa algo más que cerrar un caso de homicidio. Significa saber más cosas sobre los orígenes del ser humano, un objetivo enormemente gratificante.

Las postrimerías del siglo XIX fueron emocionantes para los geólogos, una época llena de descubrimientos y revelaciones sobre nuestro planeta. Las excursiones al campo y las excavaciones arqueológicas empezaban a ser populares. Los científicos aca-

baban de reconocer que la tierra que pisaban contenía claves sobre la naturaleza del planeta, y en especial sobre la vida primitiva de la Tierra. Entre los resultados más emocionantes se contaron los primeros descubrimientos de que en un tiempo habían existido formas de vida como los dinosaurios, antiguos dueños de nuestro planeta. Igualmente intrigantes fueron los toscos utensilios y hachas de piedra descubiertos a la orilla de ríos y en el interior de cuevas en Europa occidental. Se trataba de herramientas primitivas, pero herramientas, al fin y al cabo. Los geólogos encontraron que muchas de ellas tenían casi cien mil años y surgió la pregunta: ¿Quiénes eran los artífices de aquellos toscos utensilios?

Los primeros grandes descubrimientos de fósiles prehomínidos datan de hace poco más de cien años. (Por prehomínidos nos referimos a los antepasados de los homínidos, es decir, seres humanos y sus parientes próximos extintos.) Alrededor de la fecha en que Darwin publicó su tratado sobre la evolución biológica, se halló un cráneo de aspecto primitivo en una cueva del Valle de Neander en Alemania. Este cráneo tiene la frente estrecha y huidiza, la barbilla hundida y abultados huesos superciliares, aunque todavía exhibe un aspecto general «humanoide». Valle es *Tal* en alemán, de ahí el origen del nombre «Hombre de Neandertal». Aunque un poco extraño en comparación con los cráneos humanos actuales, no cabe duda sobre su origen humano. Sin embargo, como entonces sólo se disponía de un único cráneo fósil, fue fácil clasificarlo como un espécimen deformado de hombre moderno, opinión que prevaleció. Incluso en época tan reciente como cien años atrás, muchos científicos que abrazaron el concepto de la evolución en relación con las plantas y animales no humanos eran todavía reacios a aceptarla en relación con el hombre.

Pero hacia finales del siglo XIX se encontraron más fósiles de Neandertal. Cráneos de homínidos menos primitivos fueron hallados en numerosos puntos de Francia, en especial cerca del pueblo de Cromagnon; se trata de toda una subespecie de antepasados humanos. Con independencia de la designación científica, lo importante es que muchos de estos cráneos de aspecto extraño, aunque claramente emparentados con los humanos, se encontraron junto a una serie de herramientas primitivas. Esta proximidad indica que seres humanos capaces de fabricar herramientas vivían en Europa hace aproximadamente cien mil años. Dado que los cráneos de Cromagnon son menos primitivos que los de Neandertal, se considera en algunos sectores al hombre de Neandertal antepasado del de Cromagnon. Otros antropólogos no están tan seguros y aducen que el de Neandertal representa a una rama divergente de homínidos que se extinguió hace unos

cuarenta mil años. Sea como fuere, los hombres de Cromagnon sustituyeron a los de Neandertal hace unos cuatrocientos siglos. Y la pregunta crítica es: ¿Quiénes fueron los antepasados del hombre de Neandertal?

Abundantes descubrimientos de fósiles fijan nuestras raíces mucho más lejos en el tiempo. A principios del presente siglo se descubrieron cráneos y dientes de homínidos a gran distancia de Europa, en una árida cuenca fluvial de Java, en Indonesia. Estos cráneos, que datan de hace casi un millón de años, parecen aún más primitivos que los de Cromagnon y Neandertal y sin embargo, el tamaño, la forma y el aspecto general de estos fragmentos de cráneos y dentaduras también se asemejan a los del hombre actual. Además, el agujero de la base del cráneo, a través del cual pasa la médula espinal, está colocado de un modo que indica la postura erecta de estos seres.

Es lógico que tan asombrosos descubrimientos hechos hace poco más de medio siglo despertaran bastante escepticismo. Resulta, desde luego, difícil para nosotros imaginar la existencia en alguna parte de la Tierra de homínidos hace nada menos que un millón de años, que es muchísimo tiempo desde nuestro punto de vista, ya que representa unas cuarenta mil generaciones de vida humana. De hecho, un millón de años es más de cien veces la duración de toda la historia escrita. Expresado de otro modo, más del noventa y nueve por ciento de la historia de la humanidad sólo está registrado en los fósiles.

La confirmación de tan sorprendentes descubrimientos llegó en las primeras décadas de este siglo, cuando fueron excavados muchos fósiles similares en puntos aislados de la zona templada del planeta. Los investigadores han encontrado numerosos cráneos del hombre de Java, así como huesos del hombre de Heidelberg, del hombre de Pekín y otros fósiles, claramente homínidos, en Hungría, Francia, España y África. La mayoría datan de hace unos quinientos mil años aunque algunos se aproximan más al millón y unos pocos pueden ser incluso más antiguos. Significativamente, no son cráneos de monos ni de homínidos, sino de seres humanos, hombres y mujeres erectos que existieron hace muchísimo tiempo.

Puesto que los fósiles homínidos de menos de un millón de años tienen cráneos y dientes muy parecidos a los del hombre actual, se les ha dado la designación de *Homo*. A fin de distinguir a estos fósiles más antiguos de los hombres del siglo XX, suele añadirse un sufijo a esta designación. Por ejemplo, hombre de Neandertal, hombre de Cromagnon. Y los fósiles de otros homínidos que vivieron hace pocos centenares de milenios reciben el nombre colectivo de *Homo sapiens*. Se trata de la misma especie biológica que los hombres y mujeres actuales, aunque al-

gunos investigadores prefieren dar a los seres humanos más recientes de la historia (incluidos nosotros mismos) el título especial de *Homo sapiens sapiens*. Esta designación, sin duda otra expresión de la vanidad humana, es una etiqueta muy discutible, dado el laberinto de problemas globales que nos hemos autoinfligido los habitantes del planeta Tierra en el siglo XX.

En cambio, el hombre de Java y otros fósiles homínidos situados entre cien mil y un millón de años han recibido el nombre colectivo de *Homo erectus*. Pertenecían desde luego a la raza humana, caminaban erguidos y hacían gala de una sorprendente habilidad manual, pero el volumen de su cerebro no era tan grande ni su empleo de las herramientas tan avanzado como los del *Homo sapiens*.

La colección de cráneos de homínidos que se remontan hasta un millón de años no resuelve en realidad la cuestión fundamental: ¿Quiénes fueron los antepasados del *Homo erectus*?

La primera indicación llegó hace cincuenta años, aunque la línea de ascendencia no quedó razonablemente esclarecida hasta el pasado decenio. Una expedición antropológica en la década de 1920 descubrió un cráneo fosilizado que tenía características tanto humanas como antropoideas: un volumen craneal interior (capacidad craneal) de mayor tamaño que el del mono, aunque menor que el humano; una mandíbula mayor que la humana, pero menor que la del mono; una frente más parecida a la del mono que a la del hombre; caninos más semejantes a los humanos que a los del mono, y un orificio en la base del cráneo que indicaba que este ser había caminado erguido, o casi erguido.

Semejante mezcla de cualidades óseas sugiere que este ser pertenece al umbral de la humanidad. Todos los fósiles de esta especie híbrida entre el mono y el hombre se conocen por el nombre latino de *Australopithecus africanus*, que significa «mono meridional africano». Por desgracia, los primeros hallazgos en el suelo arenoso del sur de África no pudieron fecharse; la arena no es radiactiva y tiende a desplazarse con el tiempo. Pero este descubrimiento atrajo a la investigación paleoantropológica moderna al continente africano, donde ha permanecido desde entonces.

Las excavaciones de las dos últimas décadas han revelado numerosos cráneos y fragmentos de dientes australopitecinos. Algunos de estos hallazgos se han producido en la misma región meridional africana donde el suelo obstaculiza el establecimiento de una fecha exacta. Pero también se han encontrado numerosos fósiles similares a todo lo largo de la gran fractura tectónica de África Oriental. Por ejemplo, hace unos veinte años

se encontró un fósil de *Australopithecus africanus* sobresaliendo de una capa de cenizas volcánicas al borde de una cuenca fluvial seca en la Garganta del Olduvai, en Tanzania. Las ordenadas capas de roca volcánica pudieron fecharse, y así los fósiles australopitecinos fueron por fin situados en el tiempo. La fecha es de aproximadamente dos millones de años, estimación corroborada por hallazgos recientes. Está claro que estos prehomínidos, o prosimios, si se quiere, habitaron nuestro planeta hace muchísimo tiempo.

La designación oficial del cráneo de dos millones de años encontrado en la Garganta del Olduvai no deja de ser polémica. La familia que lo descubrió, los Leakey de Gran Bretaña y Kenia, arguye que se trata de una especie emparentada pero distinta de los australopitecinos. En particular, el descubrimiento simultáneo de utensilios de piedra muy elementales les impulsó a sugerir una designación de especie diferente: *Homo habilis*. Sin embargo, las astillas de roca que los Leakey consideran «herramientas» son muy primitivas, y resulta difícil juzgar por ellas la habilidad de esta especie. Muchos paleoantropólogos sostienen que estos fósiles son simplemente de unos australopitecos avanzados y no merecen la designación de *Homo*.

Estos antepasados homínidos de hace dos millones de años no medían más de un metro cincuenta y pesaban unos cincuenta kilos. Seguramente eran más listos que cualquier otra forma de vida con la que compartían la sabana abierta, lejos de los bosques. Es probable que su cerebro no fuera lo bastante grande como para facilitar el habla, aunque tal vez se comunicaban con un repertorio de gruñidos, quejidos, ademanes y otros movimientos del cuerpo. Los miembros más dotados debían poseer cierta habilidad manual —no como la nuestra, pero la suficiente para moldear primitivas herramientas de piedra— y una vista penetrante. Cualesquiera que fuesen sus atributos, estos seres se adaptaron bien a su medio, y esto es la clave de la supervivencia.

Trabajos más recientes indican que algunas variaciones de australopitecos pudieron coexistir en África hace varios millones de años. Centenares de fósiles australopitecinos han sido ya clasificados en por lo menos dos especies distintas de homínidos. Una de estas especies se caracteriza por una gran mandíbula y grandes molares, lo cual sugiere que se alimentaba de la áspera vegetación, semejante a la que comen los gorilas actuales. Este tipo más robusto suele llamarse *Australopithecus boisei*, o *A. boisei* o incluso *A. robustus* para abreviar. La otra especie, llamada *Australopithecus africanus* o *A. africanus* o incluso *A. gracile*, pertenece a la primera variedad descubierta en África del Sur, y se caracteriza por una mandíbula menos grande y molares de menor tamaño, lo cual sugiere una anatomía más esbelta y



seguramente una clase de homínidos que se alimentaban de carne. Estas sugerencias son sólo esto —sugerencias y no conclusiones—, pero representan el criterio dominante entre los antropólogos actuales.

Ante estos hallazgos, es natural preguntarse si las diferencias observadas en los fósiles australopitecinos podrían ser simplemente variaciones de la misma especie. Después de todo, los seres humanos de la actualidad muestran ligeras variaciones; sólo hay que observar el contraste entre los esbeltos corredores de obstáculos y los voluminosos levantadores de pesos. Sin embargo, esta interpretación parece insostenible, ya que los fósiles de seres anteriores al hombre en dos millones de años pertenecen a clases diferentes; o bien los cráneos y dientes son grandes, de tamaño exagerado, o pequeños y ligeros. ¿Podrían estos dos tipos de fósiles australopitecinos corresponder simplemente a

macho y hembra? También esta interpretación parece improbable, porque estas dos clases de fósiles casi nunca se encuentran en la misma roca sedimentaria. A menos que hubiera algo muy peculiar en las culturas de homínidos que mantuviera a tribus de machos separados de las hembras, parece imposible que estas clases correspondan a diferencias sexuales.

Así pues, por lo menos dos especies de homínidos, y posiblemente más, coexistieron en la Tierra hace muy pocos millones de años. Cabe suponer que una de estas especies es nuestra verdadera ascendencia.

Las expediciones al valle de la gran fractura tectónica de África Oriental han revelado gran cantidad de información nueva durante la pasada década. Además del rico filón de la Garganta del Olduvai, en Tanzania, varios grupos están ayudando actualmente a seguir la pista de nuestros orígenes examinando fósiles hallados en las orillas del Lago Turkana (antes Lago Rodolfo), en Kenia. Y, antes de que la guerra de guerrillas (humana) de mediados de la década de 1970 interrumpiera las excavaciones, se habían encontrado fósiles en muy buen estado de conservación en las rocas volcánicas de Omo, Etiopía, en las que resulta fácil estimar las fechas.

Entre los recientes descubrimientos realizados en varios de estos lugares, el más interesante es de signo negativo: ningún fósil de *A. boisei* tiene menos de un millón de años. El registro de fósiles de esta robusta especie de homínidos se termina bruscamente, sugiriendo una extinción rápida e insólita. La explicación más popular es que era inevitable una competición entre *A. boisei* y *A. africanus*. Cada ambiente biológico admite sólo a una especie, y, sin embargo, aquí había dos especies de homínidos tratando de ocupar a la vez el mismo ambiente. Aunque a primera vista parezca sorprendente, no es difícil comprender por qué la especie más voluminosa y robusta fue la perdedora. Pese a su físico de mayor tamaño, *A. boisei* encontró gran abundancia de vegetación y, en consecuencia, un cómodo sistema de vida. Pero esta comodidad no conduce necesariamente a una evolución rápida hacia una sociedad tecnológica inteligente. La especie de menor tamaño era seguramente más versátil, más veloz y tal vez más lista. Sólo la inteligencia básica podía ayudar al *A. africanus* a capturar la carne menos abundante necesaria para su supervivencia. El resultado fue que la selección natural intervino para ayudar al *A. africanus* a desarrollar su cerebro y sus habilidades y a ampliar su espacio vital, mientras hacía lo posible para que la población del *A. boisei* desapareciera de la faz de la Tierra. Esta teoría viene apoyada, no sólo por la extinción do-

cumentada del *A. boisei*, sino también por el reciente descubrimiento de que sólo el *A. africanus* empleaba primitivos utensilios de piedra. No se sabe si estos utensilios son simplemente una medida de la destreza manual y el desarrollo gradual del cerebro del *A. africanus*, o si fueron empleados como armas para acelerar la extinción del *A. boisei*.

Reconozcamos que, como en muchos escenarios evolutivos, los detalles aún tienen que formalizarse. Faltan muchos por descubrir. Por este motivo existen varios criterios que postulan ligeras variaciones en el cuadro evolutivo esbozado aquí. Están en primer lugar los científicos según cuya opinión los seres que usaban herramientas hace dos millones de años deberían llamarse *H. habilis*, por considerarlos una versión avanzada del *A. africanus*. Esto es casi una cuestión de semántica y la razón de que algunos científicos repliquen que el *Homo* no se remonta a mucho más de un millón de años, mientras otros sugieren que alguna especie de *Homo* ya estaba presente hace por lo menos dos millones de años y tal vez tres o más.

Otro criterio que tiene en cuenta nuevos hallazgos de cráneos, dentaduras y otros fragmentos óseos en las tierras bajas de Afar en Etiopía, sugiere que hace casi cuatro millones de años existieron seres de aspecto humano. Se han encontrado cráneos de cerebros más pequeños y caninos más grandes que los nuestros cerca de huellas conservadas en cenizas radiactivas duras que indican que estos antiquísimos seres se mantenían erguidos. Sobre la base de estos recientes descubrimientos, algunos investigadores sostienen que estos fósiles son la mejor prueba de la existencia de unos seres intermedios entre el mono y el hombre, una especie de eslabón perdido, y sugieren toda una especie nueva, el *A. afarensis*, como antepasada común del *H. sapiens* y el extinto *A. boisei*. Pero otros arguyen que los fósiles etíopes pertenecen a la especie del *A. africanus*, que en todo caso debería ser situada más atrás en el tiempo. También hay quien sostiene que estos fósiles constituyen la prueba de una versión más primitiva del *H. habilis*. Cualquiera que sea la opinión correcta, estos antiquísimos fósiles de aspecto humano prueban prácticamente que nuestros antepasados ya caminaban en posición erguida antes de que su cerebro se agrandara de modo apreciable.

Hay tantos senderos evolutivos correspondientes a los datos de todos los fósiles que un cínico podría sugerir que existen tantos senderos posibles como paleoantropólogos. El verdadero problema estriba en que el presente cuadro de la evolución humana se basa en un montón de cráneos parcialmente destrozados y dientes rotos, la mayoría encontrados en el este de África, en Asia y en Europa central. De hecho, todos los fósiles descubiertos hasta ahora no contienen las partes suficientes para reconstruir un solo esqueleto de australopiteco; el esqueleto homínido completo más antiguo es el de un hombre de Neandertal de hace sesenta mil años. No estamos tratando de confundir al lector. Existe una tendencia evolutiva general, aceptada por la mayoría de antropólogos: *Australopithecus* —*Homo*, o casi hombre— hombre auténtico. Las controversias, a menudo violentas y exaltadas, conciernen esencialmente a los detalles: fechas específicas, aparición de nuevas especies en África, Asia u otras partes, coexistencia de diversas especies, invención de nuevos utensilios, caza en comunidad, lenguaje y otras cualidades humanas. Son detalles importantes, no cabe duda. Y la emoción es comprensible, porque estas cuestiones atañen a nuestros propios orígenes. Pero hasta que se desentierren muchos más fósiles, los criterios opuestos continuarán enfrentándose. No hay nada malo en ello, ya que cada opinión es una hipótesis ligeramente distinta y cada una ha de ser comprobada experimentalmente a medida que se encuentran más fósiles. Así es cómo progresa la ciencia.

Según la opinión generalizada, la especie del *A. africanus* es el eslabón más probable entre el hombre actual y nuestros antepasados los primates, pero aunque sea válida en todos los respectos, lo cierto es que aún retrasa más en el tiempo la cuestión fundamental: ¿quiénes fueron los antepasados de los australopitecos? Aquí la respuesta es mucho más vaga porque los fósiles son más antiguos, más escasos y están peor conservados.

Se han descubierto algunos fósiles anteriores a los de las tierras bajas de Afar que todavía revelan ligeras cualidades humanas. Por ejemplo, los huesos fosilizados de un brazo y una mandíbula hallados cerca del Lago Turkana incrustados en roca tienen aproximadamente cinco millones de años. La mayoría de investigadores opinan que pertenecen a la especie del *A. africanus* o a la que la precedió, aunque nadie puede estar seguro de nada sobre la única base de un hueso de brazo y una mandíbula parcialmente destrozada. Se ha encontrado además en un lugar cercano una muela de nueve millones de años. Huelga decir que una sola muela no puede servir para seguir la pista probable de la ascendencia de los australopitecos.

La opinión paleoantropológica actual sugiere que en la Tierra vivieron seres dotados de cualidades humanas hace más de cinco millones de años, pero es desalentador no haber hallado fósiles semejantes al hombre del período que oscila entre hace cuatro y doce millones de años. Existen muchos fósiles de dicho período en casi toda la Tierra, pero se trata de restos de animales no emparentados con el hombre.



En la India, y posteriormente en África y Europa, se encontraron fragmentos de dientes y mandíbulas de los seres más antiguos que guardan alguna semejanza con el hombre o con los homínidos. La edad estimada de las rocas donde estaban enterrados indica que la edad aproximada de estos fósiles es de doce millones de años, y a pesar de ello, las mandíbulas en particular parecen tener una mezcla de cualidades humanas y antropoideas. Sin embargo, se desconoce el volumen cerebral y la postura de este ser, ya que no se ha encontrado ningún cráneo entero. Hay muy pocos de estos fósiles, y ninguno está bien conservado. No obstante, muchos antropólogos sostienen que este ser, llamado *Ramapithecus* por el dios hindú Rama, puede ser el antepasado del australopiteco, una especie de protoaustralopiteco. Pero se trata una vez más de una conjetura basada en los escasos datos disponibles. Se necesita mucho más trabajo de investigación e

interpretación para crear un retrato plausible de nuestros antepasados que habitaron la Tierra hace entre diez y veinte millones de años.

Es imposible ofrecer una descripción más exacta de dónde y cómo una especie se transformó en otra, ya que una forma de vida se mezcla gradualmente con otra en el curso de la historia. Los fósiles nunca nos presentarán a una madre antropoide dando a luz un niño humano, o a una madre de *A. africanus* pariendo a un bebé de *Homo erectus*. La evolución no funciona de esta manera; las transformaciones de esta índole son siempre graduales y requieren largos períodos de tiempo.

Todos los seres humanos actuales tienen masas cerebrales que pesan unos mil trescientos gramos. Hay ligeras variaciones de una persona a otra, aunque no parece haber grandes diferencias de comportamiento entre las personas cuyo cerebro pesa sólo mil gramos y aquellas cuyo cerebro llega a pesar dos mil.

Por otra parte, la mayoría de enfermos mentales con reducidas facultades cognoscitivas tienen cerebros sustancialmente menores. De un peso que no suele sobrepasar los quinientos gramos, el volumen cerebral de estos adultos mentalmente retardados equivale al de un niño normal de un año. Al parecer, la masa cerebral puede ser tan pequeña que su función resulte seriamente menoscabada, lo cual indica que es necesaria una masa cerebral mínima para que haya una inteligencia humana «suficiente». Una vez traspasado el umbral de los mil gramos, el comportamiento humano normal ya es posible.

¿Y nuestros antepasados? ¿Nos permiten los fósiles estimar el tamaño cerebral de algunos de los primates que prepararon el terreno para nuestra existencia? La respuesta es afirmativa. Los paleoantropólogos han podido elaborar un esbozo de la reciente evolución del cerebro, estimando la capacidad craneal de los fósiles de nuestros antepasados inmediatos sobre la base de que, tal como ocurre ahora con el hombre, el mono y otros mamíferos actuales, la masa cerebral casi llena el cráneo.

Los australopitecos parcialmente bípedos y prehomínidos de hace cinco millones de años tenían una capacidad craneal de más o menos quinientos centímetros cúbicos, lo cual es comparable en tamaño absoluto al cerebro de un chimpancé actual, y una tercera parte del actual cerebro humano. Así, los fósiles apoyan la hipótesis de que nuestros antepasados caminaban erguidos antes de que sus cerebros aumentaran de tamaño.

Los australopitecos más avanzados de hace dos o tres millones de años (*Homo habilis* para algunos investigadores) tenían volúmenes cerebrales decididamente mayores, casi todos un pro-

medio de unos setecientos centímetros cúbicos. Y no sólo eso, sino que sus cráneos fosilizados revelan una forma diferente de la de sus antepasados. Se observa un mayor desarrollo del lóbulo frontal detrás de la frente y del lóbulo temporal detrás de cada oreja, que son las regiones cerebrales asociadas con el habla, la perspicacia, la curiosidad y, sin duda, muchas otras cualidades del comportamiento. Además del hecho de que estos antepasados eran totalmente bípedos, la posibilidad de que hayan elaborado herramientas primitivas implica que dos cambios importantes del comportamiento —andar erguidos y fabricar utensilios— fueron acompañados de dos cambios igualmente importantes del volumen cerebral. Lo que ignoramos es si este incremento de la complejidad de la conducta produjo un cerebro de mayor tamaño o fue aquél una consecuencia de este último. Sin embargo, el hecho de que la posición erecta dejara las manos libres para otros fines que no fueran la propulsión parece indicar una relación causal entre la postura erguida, la fabricación de utensilios y el volumen del cerebro.

Los fósiles sugieren que el *Homo erectus*, quizá el primer hombre verdadero y nuestro pariente más próximo, tenía un volumen cerebral muy parecido al nuestro, del orden de mil centímetros cúbicos. Agrupaciones circulares de piedras grandes y pequeñas halladas junto a los restos fosilizados de esta especie sugieren, además, que nuestros antepasados de hace un millón de años encendían fuegos y construían chozas fuera de las cuevas.

Así pues, la comparación de varias capacidades craneales indica que los progresos hechos en los últimos millones de años están, por lo menos en parte, relacionados con un incremento de la masa total del cerebro. Nuevas funciones del comportamiento, una especialización neural incrementada y mejores adaptaciones culturales caracterizaron al parecer a la evolución del *Ramapithecus*, a través del *Australopithecus* (quizá también del *Homo habilis*) y el *Homo erectus*, hasta finalmente el *Homo sapiens*.

El volumen absoluto del cerebro es importante, pero no puede ser el único indicador de inteligencia. Los animales de cuerpo pequeño como las arañas tienen cerebros muy reducidos, mientras que los de cuerpo grande como los elefantes los tienen de tamaño mucho mayor. Sin embargo, las arañas actúan en muchos respectos con más inteligencia que los elefantes. Esto se debe probablemente a que el reducido cuerpo de las arañas es más fácil de dirigir y controlar. De hecho, el cerebro de los elefantes consiste en un córtex que controla los movimientos: ingentes cantidades de neuronas dedicadas al proceso de permitir a estos

enormes animales poner una pata delante de la otra sin tropezar. De ahí que la proporción entre la masa del cerebro y la masa del cuerpo parezca una mejor medida de la inteligencia.

La comparación de las masas cerebrales de diversos animales de tamaño similar revela una clara distinción entre reptiles y mamíferos. En estos últimos la masa cerebral es siempre mayor en proporción con la masa del cuerpo; en general, de diez a cien veces mayor que la de los reptiles actuales de tamaño semejante. El volumen cerebral de nuestros antepasados prehomínidos también parece haber sido mayor, en proporción con la masa corporal, que el de los otros mamíferos.

El ser dotado de la mayor masa cerebral en proporción con la corporal es el *Homo sapiens*. Le siguen los delfines, las ballenas grandes y los monos.

La proporción entre masa cerebral y masa corporal facilita, pues, una buena medida de la capacidad intelectual entre los distintos animales. El registro de fósiles puede utilizarse así para sugerir que la evolución de los mamíferos a partir de los reptiles hace unos doscientos millones de años fue acompañada por un importante incremento de la inteligencia y el tamaño relativo del cerebro, y para indicar asimismo que la aparición de los seres humanos hace varios millones de años fue también acompañada por un desarrollo cerebral correspondiente.

El cerebro es el atributo que más claramente distingue a los seres humanos de otras formas de vida terrestres. El desarrollo del habla, la creación de la civilización y la invención de la tecnología son productos de la complejidad del cerebro humano. Pero, ¿y las otras formas de vida? ¿Existen actualmente en la Tierra otros seres de complejidad comparable, animales con procesos nerviosos que les permitan comunicarse, fabricar utensilios o formar una sociedad?

La proporción entre masa encefálica y masa corporal sugiere que, después del hombre, los delfines son los animales más inteligentes de la Tierra. Junto con las ballenas y marsopas, pertenecen a una familia de mamíferos cuyos antepasados vivían en tierra firme. Seguramente a causa de la feroz competencia entre numerosos anfibios hace varios centenares de millones de años, los antepasados de los delfines volvieron al mar, sin duda en busca de alimento. Es obvio que semejante retroceso debió tener algunos inconvenientes, pero aquella decisión ancestral les salvó probablemente de la extinción.

Los delfines, tal como los conocemos hoy día, están muy bien adaptados al mar. Sus cuerpos de una fuerza excepcional tienen la forma idónea para el buceo a gran profundidad y la locomo-

ción rápida. Poseen un oído extraordinario, así como un misterioso sistema de sonar que les presta una especie de visión subacuática; este avanzado sistema de localización de ecos, actualmente en estudio por parte de funcionarios de la Marina de los Estados Unidos con fines militares, emplea una especie de radar acústico para localizar la posición y el movimiento de objetos presentes en su medio. Los delfines viajan en bancos o familias, tienen una estructura social bien organizada y se ayudan entre sí en caso de apuro; las hembras suelen actuar de comadronas para otras hembras. No son nunca hostiles, sino por el contrario amistosos en extremo tanto con su propia especie como con los seres humanos. De hecho, los delfines parecen ser la excepción de la regla no escrita de que todas las especies amistosas son a la vez de naturaleza agresiva.

No es fácil medir la inteligencia de los delfines. Los criterios aplicables a la inteligencia humana, ya de por sí polémicos, no pueden aplicarse a otras especies. Aunque el volumen cerebral del delfín es de unos mil setecientos centímetros cúbicos, algo mayor que un cerebro humano medio, experimentos de laboratorio sugieren que la inteligencia del delfín oscila entre la del hombre y la del chimpancé.

Además de su habilidad sin par para navegar bajo el agua, los delfines se comunican entre sí por medio de una serie de silbidos, chillidos, graznidos, chasqueos y otros ruidos que a veces se parecen a una insolente invectiva. ¿Podremos comunicarnos con ellos algún día? Tal vez sí, pero parte de la dificultad estriba en el hecho de que la gama de ruidos que los seres humanos somos capaces de crear y oír es relativamente limitada en comparación con el alcance auditivo muchísimo más amplio de los delfines. Se ha comprobado que pueden producir y oír sonidos dentro de nuestro radio de comunicación, pero hacerlo les obliga a gruñir y gemir en frecuencias más bajas de lo normal. La mayoría de los sonidos emitidos por los delfines son inaudibles para los seres humanos, lo cual hace improbable que su modo de expresarse llegue a ser comprendido por el hombre. No es imposible que los delfines cautivos hayan intentado durante años comunicarse con nosotros; de ser así nuestra falta de reacción debe haberles desanimado completamente.

El desarrollo de la comunicación entre especies no será fácil, ya se trate de delfines, ballenas o marsopas. Pese a ello, algunos descubrimientos empíricos indican la existencia de un terreno común para el cultivo futuro de vínculos entre delfines y seres humanos. Por lo menos, las dos partes parecen estar interesadas en semejante empresa.

Los monos también están estrechamente relacionados con los seres humanos tanto intelectual como socialmente. No sólo los fósiles dan indicaciones de ello, sino que las similitudes en la composición genética de monos y seres humanos, así como las pautas de conducta de los monos actuales, podría decirse que lo prueban.

Entre todos los miembros de la familia de los monos, la constitución genética de los chimpancés es la más parecida a la de los seres humanos; el número y la ordenación de los aminoácidos presentes en la proteína humana media son idénticos en un noventa y nueve por ciento a los de los chimpancés, siendo en especial la hemoglobina (sangre) exactamente la misma. Aunque los gorilas se parecen más que los chimpancés a los seres humanos en su aspecto externo, su estructura genética es un poco diferente y sus hábitos cotidianos difieren bastante de los nuestros.

El modo de vida de los chimpancés es el más parecido al del hombre. Se parecen más que cualquier otro animal al antepasado del que descienden tanto los monos como los seres humanos. Estudiando a los chimpancés, los behavioristas intentan discernir algo de la vida de nuestros antepasados hace varios millones de años. De hecho, los atributos actuales de los chimpancés, el medio adoptado y el comportamiento social pueden decirnos bastante sobre los sucesos evolutivos que condujeron a la aparición del ser humano, y en especial, a la manifestación de la inteligencia.

En este mismo siglo se hicieron tentativas de estudiar los modos de vida de los chimpancés cautivos en los zoológicos. Pero pronto resultó evidente que los monos y las complejidades de su sociedad sólo podían ser estudiados en estado salvaje. Y el adjetivo «salvaje» significa exactamente esto; los chimpancés y sus parientes suelen vivir en lugares remotos, lo cual no es de extrañar, pues si no tuvieran un medio diferente del de los seres humanos, la coexistencia sería imposible. La mayoría de chimpancés son tímidos y no están acostumbrados a ser observados por los hombres. Muchos habitan montañas inaccesibles, mientras otros permanecen en las copas de los árboles de espesas junglas. Abrirse paso hasta estos lugares resulta complicado para los científicos, así como los problemas de qué características deberían estudiarse y cómo habría que interpretar los datos una vez recogidos.

El trabajo organizado durante las pasadas décadas ha permitido a los investigadores concluir que los chimpancés y otros monos semibípedos son más inteligentes que otras especies de monos y que los animales cuadrúpedos. La postura erguida deja libres las manos, y la destreza manual resultante ofrece a su vez una gran riqueza de nuevas oportunidades para la vida. Por

ejemplo, se ha observado la misteriosa artesanía de los chimpancés, que fabrican rutinariamente utensilios arrancando hojas de una rama de árbol, insertándolas después en el orificio de un hormiguero, sacándolas más tarde con cuidado y lamiendo seguidamente las hormigas adheridas a las hojas.

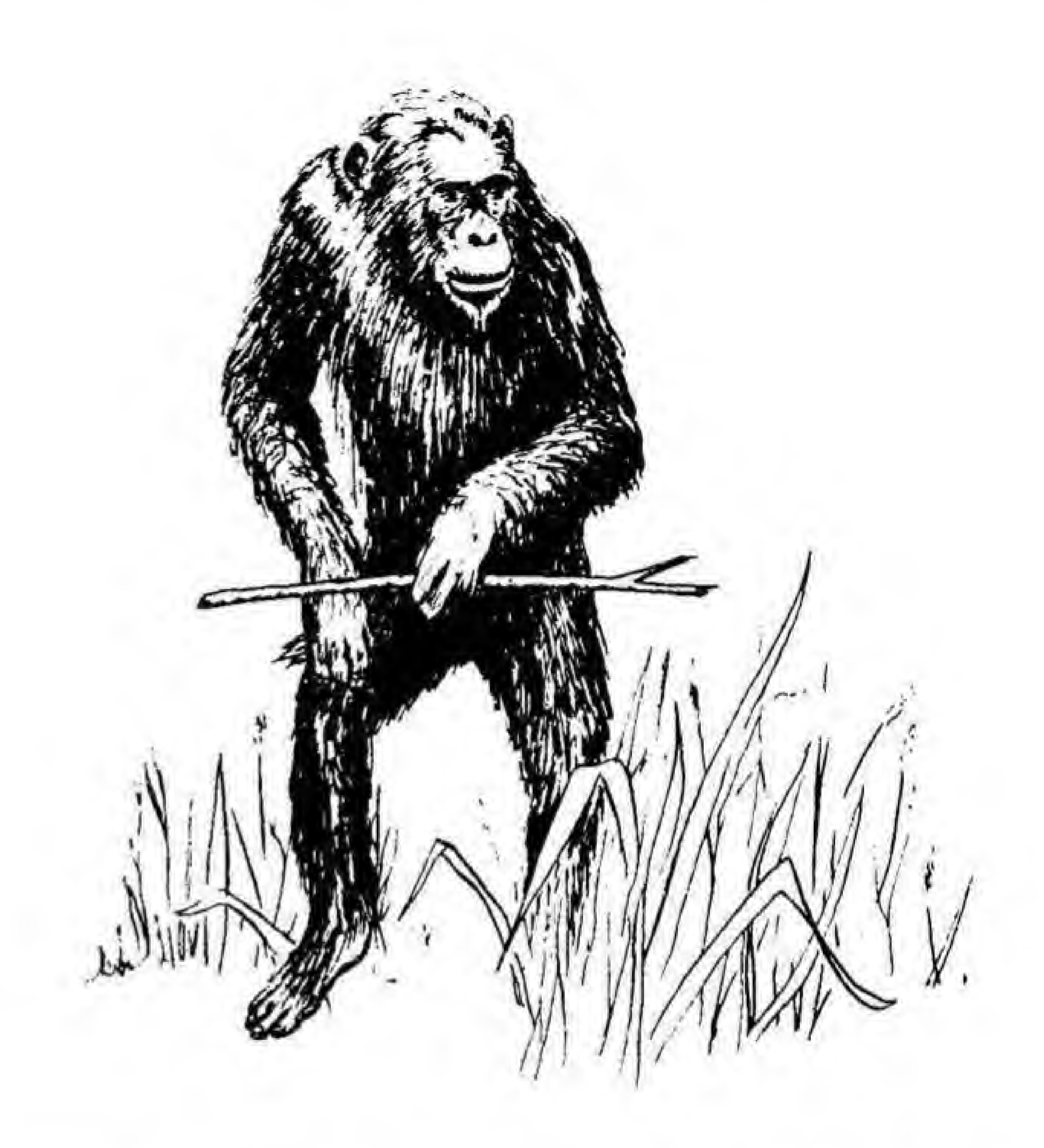
Cuál fue la causa y cuál el efecto —la habilidad de andar erguido o la capacidad de manipular con las manos— constituye en la actualidad un motivo de disputa. En lugar de la posibilidad mencionada, es decir, que la postura erguida causó la fabricación de utensilios, la situación pudo ser a la inversa: La necesidad de manipular alimentos pudo ayudar a los antepasados del hombre durante el curso de millones de años a mantenerse permanentemente erguidos. Es posible que estas dos características evolutivas tan críticamente importantes se hallen entremezcladas hasta el punto de impedirnos determinar cuál fue la causa. En realidad, cada una de las dos características pudo haber contribuido a la formación de la otra de una manera muy compleja: la postura erecta condujo a cierto grado de habilidad manual, que a su vez aceleró la transformación hacia una postura más erguida, y ésta a su vez fomentó el desarrollo de herramientas más complicadas, etcétera. Este es un ejemplo positivo de realimentación de la información (*feedback*), en que el desarrollo de un atributo estimula el de otro, causando una evolución mutua cada vez más rápida. Este refuerzo del *feedback* fue probablemente un mecanismo clave en muchas fases de la evolución prehomínida.

La fisiología y los hábitos de los chimpancés actuales revelan muchas cosas sobre nuestros antepasados australopitecos. Los chimpancés son lo bastante pequeños como para moverse entre los árboles, y también lo bastante grandes como para mantener alejados a los depredadores mientras están en el suelo. Pueden ser especialmente temibles cuando viajan como parte de un gran grupo, como suelen hacer.

El alimento favorito de los chimpancés es la fruta, en particular los higos maduros, aunque también comen carne y huevos de aves, así como serpientes pequeñas, lagartos e insectos. Se sabe que experimentan con diferentes alimentos, revelando así una curiosidad innata.

La inteligencia básica de los chimpancés se manifiesta de muchas maneras. Su comportamiento abierto y libre les capacita para intentar cosas nuevas. Además de emplear ramas como herramientas, se les ha visto valerse de rocas para aplastar objetos, agitar largas ramas sobre sus cabezas para intimidar a los enemigos y utilizar hierba como esponja para absorber agua.

Quizá aún más interesante que sus expresiones de curiosidad sea el reciente informe de que los chimpancés son capaces de



cierto conocimiento de sí mismos. Por ejemplo, si se les pone ante un espejo, primero tratan la imagen como si fuera otro chimpancé, pero en seguida se reconocen a sí mismos. Considerado hasta ahora una cualidad inherente sólo a los seres humanos, el reconocimiento de sí mismo parece formar parte del bagaje intelectual de estos notables simios.

También se conoce a los chimpancés como excelentes imitadores. Los jóvenes aprenden rápidamente de sus mayores, así como de sus amaestradores humanos. Aunque su falta de órganos vocales les impide hablar, algunos de ellos son ya capaces de comunicarse simbólicamente con los seres humanos por medio del lenguaje de signos empleado corrientemente por las personas sordas. Y lo que es más importante, se han comunicado por este medio con otros chimpancés. La conversación de este tipo sugiere que la inteligencia de los chimpancés incluye una considerable habilidad para comunicarse y aprender, y es desde luego mucho mayor que la supuesta por los científicos de la última década. Los loros y las focas también saben imitar, pero hay una gran diferencia: tanto a ellos como a otros animales hay que amaestrarlos para que lo sepan hacer, mientras que los chim-

pancés poseen la habilidad infantil innata de aprender por imitación.

Además, son sociables, aunque de un modo muy jerarquizado. En todos los grupos de chimpancés hay clases sociales bien diferenciadas, comparables en muchos aspectos a las sociedades humanas del siglo XX, ya sean del sector político, académico, industrial, comercial o militar. Uno o dos machos suelen dominar a gran cantidad de subordinados, asegurando así cierto grado de estabilidad que no se alcanzaría entre las constantes rivalidades presentes en una sociedad completamente libre. La jerarquía social no disminuye, sin embargo, su curiosidad o amabilidad. Algunos chimpancés son claramente altruistas, compartiendo su comida con otros miembros del grupo, lo cual demuestra que no son totalmente egoístas sino, por el contrario, considerados con los demás, incluyendo a los chimpancés que no son hijos suyos.

La sociedad de los chimpancés es tan compleja que un recién nacido tarda quince años en alcanzar la madurez. Como los adolescentes humanos, parece ser que los jóvenes necesitan muchos años para aprender todo lo necesario para integrarse en su organización social. En cierto sentido, los padres les enseñan. Pero aprenden tan bien, que es imposible decir con exactitud cuánta inteligencia innata poseen.

El hecho de que realmente aprendan durante sus años de formación demuestra que su medio ambiente desempeña un gran papel, por lo menos entre los chimpancés actuales. Otras especies no emparentadas en absoluto, como las abejas y las hormigas, también tienen sociedades organizadas, pero en realidad no aprenden. El medio parece influir muy poco en los conocimientos de los insectos. Estudios de laboratorio han revelado que les falta libertad de expresión individual en sus quehaceres cotidianos; los insectos dan muy pocas muestras de la curiosidad necesaria para intentar cosas nuevas. Por consiguiente, aunque su sociedad esté bien organizada, el comportamiento de los insectos no es tan complejo. Sus organizaciones sociales están casi enteramente programadas por la genética.

Hasta qué punto la inteligencia de los insectos está programada genéticamente, en lugar de influida por el medio ambiente, es un tema muy polémico. El gene (naturaleza) frente al medio (factores ambientales) es un debate que ha forjado todo un nuevo campo de investigación interdisciplinario. Llamado sociobiología, es el estudio de la base biológica del comportamiento social, y su fin es determinar los instintos sociales de una determinada comunidad de formas de vida valiéndose de los principios básicos de la psicología, la genética, la ecología y otras disciplinas aparentemente diversas. El objetivo de la sociobiología es identificar las características hereditarias que moldean a las sociedades.

La sociobiología es una ampliación del estudio de la evolución biológica clásica que incluye a la sociedad. También podría llamarse evolución social. En términos de la evolución social, se evalúa la aptitud de un individuo, no sólo por su propio éxito y supervivencia, sino también por sus contribuciones al éxito de su familia, es decir, de quienes comparten algunos de sus genes. Estas contribuciones suelen ser de índole altruista, de abnegación en pro del bienestar ajeno, lo cual es una clase de amor. Mientras la consigna de la evolución biológica clásica es «supervivencia del individuo *más apto*», la de la evolución sociobiológica sería algo así como «la conservación de una *sociedad* entera».

Muchas sociedades humanas parecen fundarse en el comportamiento altruista. Estudios exhaustivos han probado prácticamente que ello es así entre las hormigas y las abejas, así como entre otros animales. Por ejemplo, los perros salvajes regurgitan con regularidad la comida a fin de alimentar a sus crías; algunas especies de aves posponen el apareamiento para ayudar en la crianza de sus hermanas; cuando su colonia es atacada, las termitas «soldados» explotan, salpicando de veneno ejércitos enteros de hormigas. Este comportamiento es siempre el mismo, independientemente de dónde y cuándo actúen los perros, hormigas o aves. Se comportan como máquinas programadas. Una conducta tan rígida y uniforme ha inducido a muchos investigadores a sugerir que está determinada genéticamente. De ser así, cada rasgo, acto o función tiene su propio gen, que se hereda del mismo modo que el tamaño, la forma y la estructura corporal. El papel principal de estos genes del comportamiento es la conservación de la especie.

Se diría que, mientras están aprisionados en los cuerpos de las formas de vida, los genes pueden controlarlo todo. En última instancia, quizá las distintas formas de vida existan con el fin de perpetuar los genes... esos genes egoístas.

La sociobiología es un tema polémico en la actualidad porque sus partidarios sostienen que sus principios centrales pueden aplicarse tanto a las sociedades de hormigas como a las de formas de vida más avanzadas, incluyendo a las humanas. Nunca dejan de surgir problemas cuando los científicos hacen grandes declaraciones sobre nuestra propia especie; algunos aspectos de la naturaleza humana no parecen coincidir con nuestra idea del decoro. La cuestión principal es: ¿Hasta qué punto imita la conducta humana el comportamiento de los insectos y su

base predominantemente genética? En otras palabras, ¿qué influencia predomina sobre las acciones humanas, la naturaleza o los factores ambientales? Así que la raíz de la controversia es la comprensión humana de las cuestiones humanas.

En general, los investigadores se distribuyen en dos grupos, cada uno de los cuales concede que las influencias ambientales desempeñan el papel principal en el comportamiento humano. Uno de ellos sostiene que el medio ambiente es la única influencia importante; las diferencias de comportamiento entre diferentes seres humanos se deben exclusivamente a factores sociales, culturales y políticos. El otro grupo mantiene que el gene posee una importancia considerable; tal vez contribuya sólo con una décima parte, pero lo suficiente para que muchas características (agresión, envidia, simpatía, amor, temor, inteligencia, entre otras) estén en su mayor parte predestinadas en los seres humanos. Este segundo grupo sugiere que muy poco puede hacerse para alterar el comportamiento humano básico porque está en su mayor parte biológicamente determinado por los genes. Afirma, por ejemplo, que el comportamiento de las mujeres que sufren hambre para alimentar a sus hijos, o el de las personas que arriesgan su vida para salvar a un náufrago, no está gobernado completamente por la voluntad. Al igual que el deseo de un insecto de conservar su propia especie, semejante conducta es una reacción inconsciente de los genes para asegurar la supervivencia de nuestro propio género.

Si este segundo grupo está en lo cierto, será importante que tanto psicólogos como psiquiatras presten atención; la conducta de los individuos puede estar en gran medida predeterminada biológicamente. También los sociólogos deben tomar nota, porque la sociobiología les facilitará alguna vez métodos cuantitativos con los que poner a prueba la superabundancia de criterios aún no corroborados. En realidad, la economía, la ley y la política podrían llegar a formar parte de la recién aparecida sociobiología.

El altruismo, el amor y la curiosidad son atributos asociados, no sólo con los seres humanos, sino también con los chimpancés y probablemente otros animales. Esto no quiere decir que los chimpancés sean amables y simpáticos en todas las ocasiones, ya que también se parecen al hombre en otro aspecto: un deseo ocasional de mostrarse innecesariamente agresivos. Cierta hostilidad en el seno de las especies, así como entre ellas, es un ingrediente normal y tal vez esencial de la evolución biológica y cultural. Sin un elemento de agresión disfrazado de competencia, pocas especies podrían sobrevivir o adaptarse a un medio

cambiante. Pero la agresión innecesaria es otra cosa muy distinta.

Recientes estudios de campo en Tanzania revelan que algunos chimpancés asesinan a otros sin ninguna razón aparente relacionada con la supervivencia. Los ataques, premeditados y en equipo, fueron dirigidos por un gran grupo de machos contra un grupo más reducido de machos y hembras previamente separados de la familia. En el transcurso de cinco años, cada miembro del grupo disidente fue sistemática y brutalmente golpeado. Todos murieron. Sólo machos jóvenes iniciaban los ataques, que no se producían hasta que las víctimas estaban aisladas de los demás. Los atacantes solían usar manos, pies y dientes, aunque algunos investigadores les vieron lanzar piedras. Es de esperar que estudios comparativos como éstos descubran las razones, no sólo de las fechorías de los chimpancés, sino también de la beligerancia humana, ayudando tal vez con ello a la supervivencia de la especie humana, que no puede tolerar por más tiempo la agresión entre las especies.

Pese a las controversias actuales sobre muchos detalles, varios estudios del comportamiento de los chimpancés han contribuido enormemente a la adopción de un acuerdo en lo referente a la ascendencia de los seres humanos. Cuando animales parecidos a chimpancés empezaron a abandonar la selva para dirigirse a la sabana hace algunas decenas de millones de años, probablemente se vieron obligados a ser más sociales a fin de sobrevivir. Los orígenes de nuestra organización social pueden muy bien remontarse al medio nuevo y más duro de las praderas abiertas donde debía haber menos comida, menos protección y más necesidad de cooperación entre los grupos. Las dificultades dieron a nuestros antepasados la oportunidad de aprender. Su experiencia fue creciendo en el curso de millones de años. La mentalidad intolerante de los animales de la selva cedió el paso a la perspectiva más amplia de nuestros antepasados de la sabana. Aquel mundo repentinamente más dilatado causó la evolución de cerebros de mayor tamaño capaces de almacenar un espectacular incremento de información.

La emigración de los árboles a las praderas fue una especie de renacimiento. Una vez comenzada, la carrera ya no podía detenerse... una carrera hacia la ocupación de espacios completamente nuevos, hacia el desarrollo de nuevos estilos de vida y a la postre hacia la inteligencia en el sentido tecnológico.

Casi todos los investigadores están de acuerdo en que nuestros antepasados debieron sobrevivir durante los últimos millones de años gracias a la caza y la búsqueda de alimentos. El hábito adquirido de perseguir y consumir carne fue probablemente exportado de la selva a la sabana, donde se intensificó debido a la relativa falta de fruta en las llanuras abiertas. Aunque la mayoría de habitantes de la civilización moderna ya no se consideran cazadores ni recolectores de fruta, tal fue el oficio de todos nuestros antepasados de hace varios millones de años hasta que surgió la agricultura hace sólo unos diez mil.

¿Cómo podemos saber si cazaban los primeros homínidos, incluso los avanzados australopitecos? La evidencia es doble, y ambas partes se encuentran en los fósiles. Primero, en numerosos asentamientos del África Oriental, en el valle del Serengeti, se han hallado cerca de los huesos de nuestros antepasados, restos de los esqueletos de una gran variedad de animales. Estos esqueletos no están intactos, sino que son más bien una colección de huesos desperdigados. Y segundo, más convincente todavía, herramientas de piedra han sido encontradas repetidas veces junto a los restos de australopitecos de dos millones de años, así como de otras especies humanas más recientes. Estos utensilios de piedra han resistido millones de años, y parece acertado concluir que antepasados incluso más primitivos pudieron empuñar herramientas de madera que se pudrieron con el tiempo.

A juzgar por las formas de los utensilios de piedra desenterrados en la Garganta del Olduvai, muchas de estas herramientas del tamaño de un huevo se empleaban para triturar, cortar y preparar alimentos para su fácil consumición. Otras muchas, en cambio, sugieren su uso como armas, sobre todo las piedras redondeadas que probablemente se lanzaban para matar o mutilar. Otras piedras se parecen claramente al extremo superior de una maza, que debía usarse para matar las presas. Como ya se ha observado, tales fueron quizá las «herramientas» empleadas por el avanzado *A. africanus* (o *H. habilis*) para exterminar a su pariente, el *A. boisei*, hace un millón de años.

Las piedras no se usaban únicamente para hacer utensilios y armas; también proporcionaban la base de los primeros hogares. Un poblado de hace dos millones de años en la Garganta del Olduvai, por ejemplo, contiene una estructura circular de piedras que parece ser los cimientos de una especie de choza. Esta albañilería es anterior a lo que ahora se llama popularmente la Edad de Piedra.

La duración de la Edad de Piedra depende del lugar en que se excave, y abarca un período de un millón de años que termina aproximadamente hace unos diez mil años. Cualquiera que sea su fecha, esta nueva era se distingue por los utensilios de piedra

cada vez más complicados, entre los que se encuentran diversos tipos de hachas de mano, espátulas, buriles y raspadores. Es fácil observar la constante transición de utensilios bastante toscos a otros más avanzados junto a los fósiles de especies biológicas. De ahí que el principio de la Edad de Piedra suela asociarse con la aparición del *Homo*. No cabe duda de que la fabricación de utensilios anterior a la Edad de Piedra aceleró la evolución de los primeros seres humanos auténticos.

Gran parte de este desarrollo de los utensilios de piedra precedió al agrandamiento del cerebro. Los primeros homínidos que trabajaron la piedra tenían un cerebro sólo un poco mayor que el de los chimpancés actuales, de un volumen que apenas sobrepasaba los quinientos centímetros cúbicos. El empleo de herramientas y la postura erguida, dos características de la habilidad manual, fueron poderosos desarrollos evolutivos, cambios fundamentales que precipitaron muchas nuevas oportunidades para la vida. Sin que nuestros antecesores lo supieran, sus utensilios de piedra marcaron los albores de una sociedad industrial y una cultura tecnológica. La diferencia entre hacer cucharas de piedra y gigantescos reactores es sólo una cuestión de grado.

Así pues, el umbral de la tecnología es difícil de situar con exactitud, aunque pudo aparecer hace más de un millón de años. El comienzo de actividades culturales frente a las utilitarias se produjo tal vez por las mismas fechas, ya que se han encontrado polícromos pigmentos minerales junto a los esqueletos de los primeros hombres. Incluso es posible que los australopitecos más avanzados hiciesen alguna ceremonia ritual, a juzgar por los guijarros dispuestos geométricamente que se han hallado con frecuencia junto a sus restos.

Pero hasta las postrimerías de la Edad de Piedra no aparecieron empresas industriales más complicadas, y los avances tecnológicos como la construcción de la rueda hace cincuenta mil años, y la invención del arco y las flechas hace unos diez mil, fueron acompañados por avances culturales como los entierros más antiguos en ciertas cuevas europeas y asiáticas hace casi setenta mil años, y los comienzos del arte prehistórico en las paredes de las cuevas de Europa occidental hace unos treinta mil. Se trataba de invenciones humanas únicas, de productos culturales del *Homo sapiens*, incluyendo al hombre de Neandertal y especialmente al de Cromagnon.

El sendero exacto de la evolución humana durante el pasado millón de años es difícil de seguir con detalle. Entre las cosas que nos hicieron verdaderamente humanos figuran los productos creativos de la emoción y la imaginación, cualidades casi imposibles de definir científicamente. Entre las causas de la evolución reciente no sólo figuran factores biológicos sino también

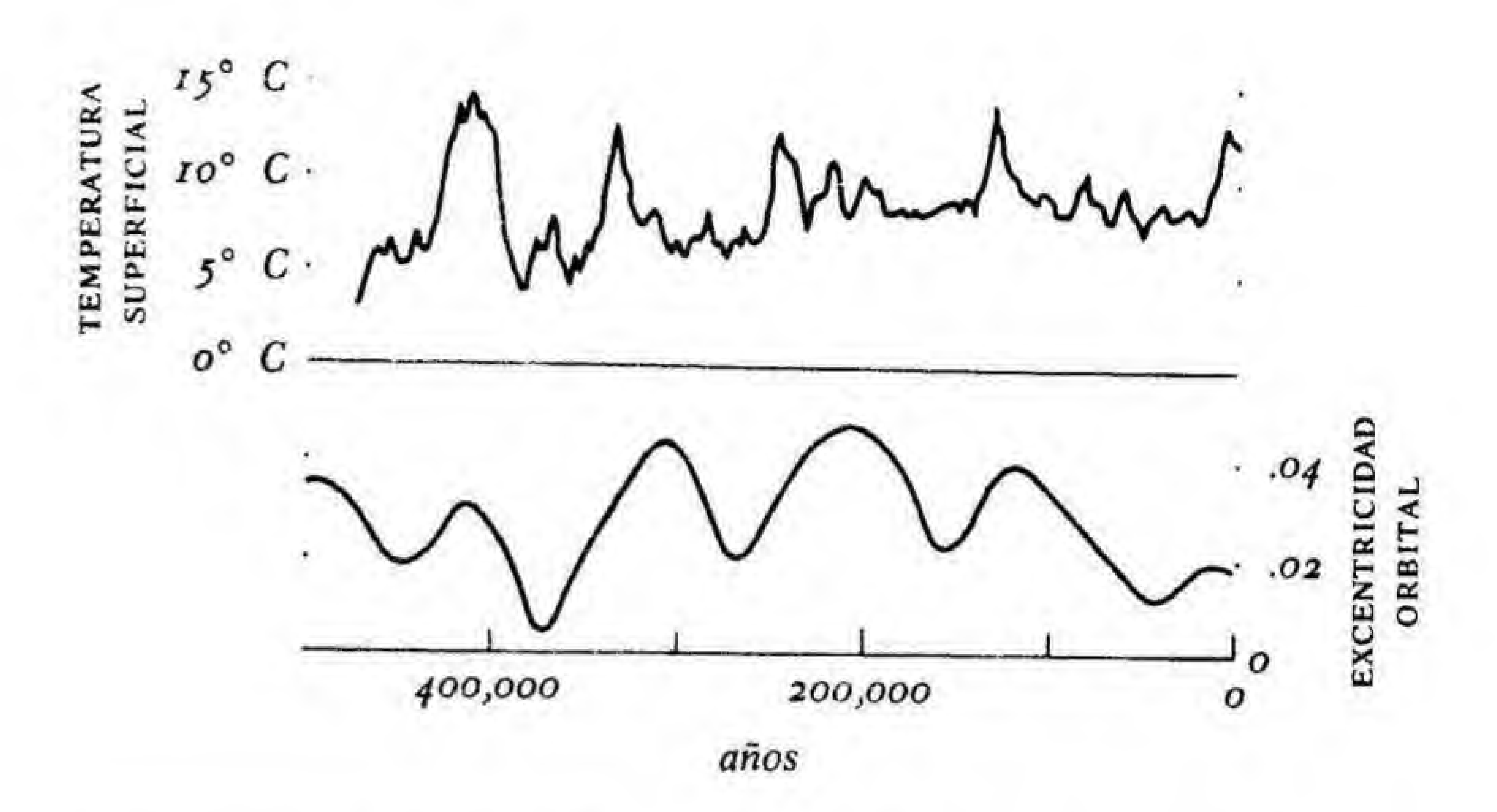
culturales y tecnológicos. En el incremento del volumen cerebral ha entrado en juego un complicado sistema de retroalimentación: la innovación de la cultura, la invención de habilidades técnicas mejoradas y el desarrollo de una compleja comunicación verbal y organización social. Los cambios fueron muy lentos al principio, pero se han acelerado notablemente en el curso de los últimos cien mil años. Cualesquiera que sean las razones, estas múltiples innovaciones han permitido al *Homo* gozar de un éxito sin precedentes como forma de vida en el planeta Tierra, ya que sólo nosotros podemos afrontar tecnológicamente las cuestiones fundamentales.

Los cambios que dieron origen a la humanidad fueron evolutivos, no revolucionarios. Se produjeron mediante las habituales adaptaciones a un medio ambiente que cambiaba con lentitud. Pero su ritmo se fue acelerando rápidamente. La ampliación de oportunidades para la vida hace varios millones de años precipitó el ritmo de la evolución. Y no ha sufrido el menor retraso desde entonces.

Los cambios ambientales son el motor de la evolución, que permite a algunas formas de vida adaptarse con éxito mientras obliga a otras a extinguirse. Aparte de los cambios estacionales que se producen de mes en mes, y de los desplazamientos continentales que se prolongan durante millones de años, parece que el planeta Tierra experimenta cambios climáticos globales que duran miles de años. El registro climático, que se remonta a por lo menos medio millón de años atrás, se ha derivado de una serie de técnicas que incluyen el análisis de muestras de núcleos tomadas de las regiones polares y de sedimentos arenosos extraídos del fondo del suelo marino, así como la evidencia geológica de los ciclos de congelación y deshielo.

Los cambios climáticos se cuentan entre las alteraciones ambientales más importantes de la Tierra. Como demuestran los datos, nuestro planeta ha pasado por numerosos ciclos de clima frío y seco, períodos intermitentes conocidos popularmente como períodos glaciales e interglaciales. Aunque los datos son fragmentarios, cada período glacial, así como su correspondiente período interglacial, ha durado al parecer varias decenas de miles de años. Ahora atravesamos un período interglacial, una especie de deshielo temporal, una tregua geológica antes de sumirnos de nuevo en la congelación.

¿Cuál es la causa de estos ciclos de calentamiento y enfriamiento de nuestro planeta? Algunos científicos sostienen que la glaciación aumenta durante los períodos de actividad volcánica global, cuando el polvo expelido reduce la cantidad de luz solar



que penetra en la atmósfera terrestre. Otros sugieren que las alteraciones periódicas del campo magnético de la Tierra causan la desaparición del cinturón protector de Van Allen, permitiendo así que elevadas dosis de radiación solar calienten esporádicamente el suelo y hagan disminuir la glaciación. Otros investigadores han ofrecido la posibilidad de que los períodos glaciales puedan deberse a variaciones en la potencia del propio Sol, al paso de la Tierra a través de una nebulosa interestelar, a la circulación profunda de los océanos terrestres, o a cualquiera de una larga lista de causas posibles.

Sin embargo, los científicos han encontrado hace poco tiempo, pruebas convincentes en apoyo de otra teoría, según la cual cambios sutiles, aunque regulares, en la órbita terrestre alrededor del Sol iniciarían los períodos glaciales. Estos cambios son resultado conjunto de tres efectos astronómicos, cada uno de ellos causado por la influencia gravitatoria normal de otros planetas sobre la Tierra; primero, alteración de la *forma* o excentricidad de la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol; segundo, cambios periódicos en la inclinación del eje de la Tierra; y tercero, *deformación* de la órbita terrestre, causada por la posición variable de los otros planetas, cada uno de los cuales ejerce una atracción gravitacional. A veces la combinación de estos tres efectos resulta en un calentamiento anormal (como el que estamos experimentando ahora); otras, la radiación solar se reduce considerablemente, produciendo una glaciación general y un descenso de las temperaturas.

Esta hipótesis de un período glacial inducido astronómica-

mente es, en la actualidad, el aceptado por la mayoría de científicos, principalmente porque las muestras de sedimentos del fondo del mar revelan que, en el curso de los últimos quinientos mil años, minúsculos seres marinos llamados plancton han prosperado en ciertas épocas, mientras apenas han logrado sobrevivir en otras. Estudios de la abundancia de plancton fosilizado que prefiere el agua caliente a la fría, facilitan la estimación de la temperatura predominante en el curso de sus vidas. Esta supuesta temperatura del agua se correlaciona bien con el calculado calentamiento y enfriamiento de la Tierra por medio de los efectos astronómicos conjuntos mencionados más arriba. Cabría suponer, pues, que ligeras peculiaridades en la geometría orbital de la Tierra son las principales responsables de los períodos glaciales; las investigaciones ulteriores demostrarán hasta qué punto lo son.

Aparte de su causa, los períodos glaciales deben haber ejercido un profundo impacto sobre la evolución de la vida terrestre. La glaciación importante más reciente empezó hace casi cien mil años, y hará ya unos diez mil que el clima volvía a ser más o menos como el que ahora conocemos. En el punto culminante de este período glacial, treinta mil años atrás, una capa helada de un kilómetro de espesor se extendía desde el Polo Norte hasta cubrir gran parte del norte de Estados Unidos y la Eurasia septentrional y central. La temperatura de superficie de la Tierra era varios grados centígrados más baja que ahora, mientras que la superficie del mar, con gran cantidad de agua contenida en gigantescos icebergs, estaba cien metros por debajo de la actual.

Los últimos diez mil años han visto la retirada de los glaciares, la inundación de las llanuras costeras, la extensión de la vegetación hacia latitudes más septentrionales y el calentamiento del océano y de la atmósfera. Esta transformación climática ocurrió rápidamente según los patrones geológicos. Los cambios del medio ambiente terrestre provocados por el calentamiento ayudaron seguramente a nuestros antepasados humanos a realizar los numerosos avances alcanzados durante este período de grandes innovaciones. Los seres humanos tuvieron que adaptarse —adaptarse biológica, cultural y rápidamente— a cambios en el aire, el mar y la tierra. El motor de la evolución se había acelerado.

Además de estimular la rápida aparición de productos innovadores, los períodos glaciales pueden haber acelerado asimismo la emigración y la colonización de nuevas tierras. Por ejemplo, los científicos saben que los seres humanos no evolucionaron en las Américas; no existen fósiles de primates de los que podrían descender. El consenso antropológico sostiene que los seres humanos llegaron al Nuevo Mundo en fecha muy reciente, hace sólo algunas decenas de miles de años. Se ignora cómo viajaron hasta allí, pero durante una de las glaciaciones más recientes debió formarse el hielo suficiente para permitirles trasladarse a pie a través del Estrecho de Bering entre lo que ahora llamamos Alaska y Rusia. De hecho, tal es el criterio predominante; los nativos del norte, centro y sur de América son descendientes de asiáticos que emigraron allí hace unos centenares de siglos. Una vez establecidos en las Américas, estos emigrantes desarrollaron las artes, el lenguaje, muchos productos y otras numerosas innovaciones culturales. Pero si las civilizaciones de las Américas experimentaron una evolución cultural totalmente independiente de las de Eurasia, o si mantenían con ellas un contacto to-



davía no descubierto, es un importante tema de controversia en la arqueología moderna.

Varios factores contribuyeron a hacer de nosotros unos seres eficientes y el descubrimiento de la utilidad del fuego es el fundamental. Los seres humanos emplean el fuego como fuente de iluminación y calor desde hace casi un millón de años; el examen arqueológico de cavernas en Francia ha revelado hogares fósiles de esta antigüedad. Así pues, la esencia del fuego se apreciaba básicamente hace muchísimo tiempo, y se empleaba sin duda para proporcionar calor en los climas más fríos. Sin embargo, sus otras utilidades no parecen haberse reconocido hasta hace poco. La práctica de asar los alimentos, por ejemplo, no se desarrolló hasta hace unos cien mil años, y es probable que las técnicas para endurecer por el fuego puntas de lanza y otras herramientas sean inventos todavía más recientes. Es significativo que el uso generalizado del fuego fuera uno de los últimos grandes pasos en la domesticación del hombre.

Hace diez mil años, los seres humanos idearon maneras de extraer el mineral de hierro y de convertir el sílice en vidrio, así como sistemas para fundir el cobre y endurecer el barro. El fuego tuvo muchas otras aplicaciones industriales, como la fabricación de nuevos utensilios y la construcción de chozas de arcilla. Pero, por desgracia, no existe un criterio unánime sobre la cronología de estos descubrimientos fundamentales. Hasta la fecha se ignora qué invento preparó el camino de los siguientes. Por ejemplo, algunos arqueólogos sostienen que, después del calor y la luz, la cocción del barro fue el primer empleo organizado del fuego, más antiguo todavía que la cocción regular de alimentos. En cambio, otros arguyen que la necesidad de recipientes de barro surgió porque cocer alimentos ya era algo establecido; de hecho, el primer uso de cualquier recipiente debió ser la cocción y conservación de la comida.

Cuando los inventos están tan estrechamente ligados, nunca se sabe con claridad cuál fue la causa y cuál el efecto. Tanto la motivación como el momento exacto de un invento son difíciles de establecer. Quizá nunca podamos situar algunas de las secuencias más cruciales, pero hay algo de lo que sí estamos seguros: numerosos usos mecánicos y químicos del fuego se han dominado durante los últimos diez mil años, y algunos bien pudieron descubrirse incluso con anterioridad a este plazo.

Productos antiguos de arcilla, metal y vidrio pueden encontrarse todavía en los bazares y talleres de Afganistán, China, Irán, Tailandia, Turquía y otros países generalmente asiáticos. Los resultados más modernos de estas antiguas tecnologías son evidentes en las ciudades de acero, cemento y plástico de nuestro siglo XX. Pero los cambios de esta índole no se producen sin problemas; la necesidad básica del fuego se ha visto acompañada a menudo de lamentables consecuencias, como la contaminación ambiental y la escasez de energía que sufrimos en los tiempos actuales.

El desarrollo del lenguaje, esa mezcla de habla y facultades cognoscitivas, fue otro factor crucial de la cultura. El inicio de la comunicación coherente se relaciona probablemente con la caza y la fabricación de utensilios mediante un complejo mecanismo de realimentación de la información que condujo al desarrollo ulterior de ambos. La comunicación simbólica, como los movimientos corporales y las señales con los brazos, debió ser una ventaja obvia en la caza mayor. De igual modo tuvo que ser precisa alguna clase de comunicación para transmitir las habilidades rudimentarias como el uso y la fabricación de utensilios. Y el lenguaje era aún más importante porque atesoraba dicha experiencia en el cerebro en calidad de memoria y podía pasarse de generación en generación.

Aunque no existen pruebas directas, es posible que se empleara algún tipo de lenguaje primitivo hace un millón de años o más. El lenguaje más elaborado llegó mucho más tarde, aunque nuevamente es difícil situar su origen y evolución con algún grado de exactitud. Los utensilios hechos por los primeros seres humanos facilitan algunas claves de las facultades cognoscitivas y habilidades manuales requeridas para desarrollar tan avanzadas técnicas de comunicación como el habla y la escritura.

La excavación de cuevas, la mayoría de ellas en Europa, nos ha descubierto un filón de estatuíllas y huesos con diversos grabados o marcas. Las más antiguas datan de unos cincuenta mil años atrás. Las marcas de algunas de las estatuíllas indican que tenían ciertas funciones simbólicas. Como la laringe del hombre de Neandertal no podría haber pronunciado todos los sonidos del lenguaje moderno, muchos investigadores creen que los grabados de estos objetos representan una clase primitiva de comunicación. Análisis recientes han corroborado este criterio al encontrar el mismo repertorio de marcas repetido en muchos de los huesos y estatuas. Al parecer, los grabados no son accidentales ni simplemente decorativos, sino simbólicos. Estos objetos grabados se cuentan entre los primeros intentos conocidos de mejorar los gruñidos y quejidos empleados no sólo ahora por los chimpancés modernos, sino también hace mucho tiempo por nuestros antepasados los australopitecos.

El mérito de haber sido los primeros en escribir textos suele

adjudicarse a los sumerios, que habitaban una llanura junto al golfo Pérsico conocida entonces como Mesopotamia. Hace casi seis mil años, esta antigua civilización desarrolló un intrincado sistema de números, ideogramas y símbolos abstractos. Han sido excavadas miles de tablillas de arcilla sumerias y todas muestran que se empleaba un punzón de madera o hueso para grabar una gran diversidad de ideogramas. Se estima que el vocabulario básico de los sumerios era extenso: no menor de mil quinientos signos. Aparecen dibujados animales salvajes como el zorro y el lobo, pero los textos aún no han podido ser descifrados totalmente. Al no contener solamente simples imágenes, los mensajes de estas tablillas representan un estadio avanzado en la evolución del arte de la escritura.

Los escritos sumerios se han conservado principalmente porque fueron grabados en arcilla cocida. Si muchos de los símbolos procedían de civilizaciones más antiguas, es probable que éstos escribieran exclusivamente en papiro o madera, que no tardó mucho en pudrirse.

El criterio predominante entre los antropólogos es que la escritura evolucionó de lo concreto a lo abstracto. Hace varias decenas de millares de años, los símbolos grabados en los huesos y en las paredes de las cavernas debieron empezar a volverse cada vez más esquemáticos hasta que, hace unos miles de años, cada símbolo sólo representara una idea. Esta evolución pudo ser intencionada, o también resultado de la negligencia de los antiguos escribas. En cualquier caso, significa que las imágenes precedieron a la escritura simbólica, la cual condujo a su vez a la escritura moderna.

Los grabados en estatuíllas y huesos pueden haber tenido algo que ver con el origen de la ciencia antigua. Estos grabados de hace varias decenas de miles de años parecen tener una relación con el ciclo lunar, como si se hubieran querido representar las fases de la Luna, y tal vez sean los primeros intentos de llevar la cuenta de las estaciones. Los grabados de esta clase, así como los grandes murales de las cavernas, sugieren que los hombres y mujeres de finales de la Edad de Piedra eran conscientes de las variaciones periódicas de las estaciones en plantas y animales. Mientras algunos arqueólogos prefieren interpretar estas marcas en hueso como un simple juego aritmético, la hipótesis que acabamos de formular sostiene que se trata de los primeros calendarios o instrumentos científicos para calcular el tiempo.

Los primeros escritos en que se describe el uso de instrumentos científicos datan de muchos miles de años después. Los jeroglíficos de hace tres mil años documentan en parte el conocimiento egipcio del reloj de sol, pero el reloj solar más antiguo excavado hasta la fecha es un trozo de piedra grecorromana cincelada hace unos dos mil años. Los relojes solares griegos y romanos revelan importantes refinamientos sobre los anteriores modelos egipcios conocidos por nosotros, ya que no sólo marcan la hora del día, sino también el día del año. Ni la duración de la «hora» ni la construcción del calendario es la misma de la actualidad, pero estos antiguos instrumentos científicos eran ya capaces de predecir la regularidad de los cambios diarios, estacionales y anuales de la Tierra, identificando así el ritmo básico del ciclo agrícola.

Los monumentos megalíticos, entre los más famosos de los cuales están las pirámides de Egipto y Stonehenge en Inglaterra, son ejemplos del conocimiento y utilización del firmamento por parte de los primeros seres humanos. Stonehenge puede usarse para predecir el primer día de verano, y posiblemente eclipses, por el alineamiento de las grandes piedras con la salida y el ocaso de ciertos objetos celestes. Varias estructuras similares, aunque quizá no tan grandiosas, están diseminadas por Europa, Asia y las Américas. En América central, antiguos «templos» en forma de pirámide tienen ojos de buey en miniatura a través de los cuales se pueden observar objetos celestes, en particular Venus, en momentos propicios del año. Los astrónomos de la civilización maya de la Edad Media eran esencialmente sacerdotes que ostentaban el poder de usar sus conocimientos de los objetos celestes para determinar los destinos de individuos, ciudades e incluso naciones enteras.

Hace mil años, estas culturas centroamericanas habían influido a muchas tribus de indios norteamericanos que vivían en las praderas de Cánada y lo que es ahora el Oeste de Estados Unidos. Recientes descubrimientos de numerosas estructuras de «ruedas medicinales» hechas con piedras grandes dispuestas en diversos diseños de anillos y radios demuestran claramente la fertilización intercultural. Aunque el empleo exacto de estas configuraciones de piedras es confuso, puesto que los indios carecen de lenguaje escrito, algunos investigadores sugieren que estas estructuras pudieron servir de calendarios que marcaran la salida del Sol en ciertas épocas del año.

Así, aunque la investigación científica moderna, incluyendo instrumentos como los inmensamente útiles microscopio y telescopio, sólo se remonta a quinientos años podemos estar seguros de que los hombres anteriores al Renacimiento conocían bien la astronomía elemental, las matemáticas, la ingeniería mecánica y muchos otros conocimientos técnicos. En realidad, las raíces de la tecnología se remontan a muchísimo tiempo atrás. Nuestros antepasados parecen haber poseído técnicas más avanzadas que

las que muchos investigadores han estado dispuestos a atribuirles.

La mención de los sacerdotes astrónomos mayas del antiguo México nos recuerda otro factor que contribuyó a la evolución cultural del hombre, un factor más elevado que nos impulsa a averiguar quiénes somos y a comprender nuestro lugar en el esquema general de las cosas. De hecho, el epítome de la cultura es la búsqueda de la verdad, la necesidad de conocernos a nosotros mismos y el mundo que nos rodea. El deseo y la facultad de emprender esta búsqueda nos identifica verdaderamente como seres humanos, distinguiéndonos de todas las demás formas de vida conocidas. La comprensión es el principal objetivo de la ciencia, que comparte con otras disciplinas. La religión, las artes, la filosofía, entre otras, representan distintos esfuerzos para averiguar quiénes somos y cuál es nuestro origen.

Durante millares de años los seres humanos han reconocido que el mejor modo de desvelar un misterio es comprenderlo. Las pinturas rupestres del sur de Francia de unos veinte mil años de antigüedad, pueden ser los vestigios más antiguos de incipientes rituales mágico-religiosos celebrados en oscuros rincones de la Tierra. Las imágenes de las cuevas parecen representar ritos en los que mitos inextricables tal vez asociaran a los cazadores con los animales muertos.

La fe en lo sobrenatural y el empleo de actividades místicas están mejor documentados hacia los comienzos de la historia civilizada. En algunas inscripciones sumerias de hace cinco mil años se registran unos mitos según los cuales los dioses crearon a los hombres para que fueran sus esclavos. Este sistema garantizaba la entrega de comida, ropa y otras necesidades de la vida a las casas de sacerdotes o a los templos con el fin de agradar a los dioses, o al menos aplacarlos. Semejante forma de sociedad separaba a los jefes de los subordinados y a los sacerdotes de los plebeyos. Al parecer, cualquier persona que poseyera algunos conocimientos sobre incluso el más sencillo de los sucesos celestes podía subyugar a las masas; a los ojos de los campesinos, por ejemplo, cualquiera que predijese las estaciones debía tener una relación especial con los dioses, y por consiguiente, merecía ser obedecido. Sin necesidad de dedicar tiempo a la búsqueda de su propio alimento, los poderosos sacerdotes de Sumer podían adquirir habilidades y conocimientos mucho mayores que los alcanzados hasta entonces por los seres humanos.

Esta fabricación de mitos distribuida al populacho provocó una mayor especialización y permitió que legiones de seres humanos trabajaran en las tareas sociales y técnicas que hoy día

identificamos como vastos proyectos de irrigación y templos monumentales en las llanuras de Mesopotamia.

La poesía sumeria de hace varios miles de años documenta claramente cómo la religión de Sumer incorporó una teología sistemática de fenómenos humanos, terrestres y cósmicos. Aspectos de la naturaleza —el Sol, la Luna, las tormentas, el trueno, etcétera— fueron personificados de modo que unos seres humanizados representaban el papel de dioses en un mundo divino-político dirigido por el dios residente en los cielos.

Este credo resultó ser muy poderoso, porque el sistema era complejo y el populacho no hacía preguntas. Durante varios miles de años, los sacerdotes de Mesopotamia embaucaron a las masas con especulaciones cada vez más intrincadas. Incluso los bárbaros que les rodeaban, antepasados de los antiguos griegos, romanos, celtas, germanos y eslavos, estaban convencidos de que los dioses de Sumer gobernaban al mundo. Al parecer, los mitos se convierten en verdades si se mantienen el tiempo suficiente.

En cierto modo, el sistema social jerarquizado ayudó a mantener la cohesión y uniformidad; la jefatura de los sacerdotes ofrecía una influencia estabilizadora, como en principio todas las religiones. Pero las inscripciones sumerias también hablan de luchas provocadas por disputas sobre los derechos de agua y a menudo inspiradas por facciones y coaliciones religiosas rivales, luchas que acababan siendo a vida o muerte. Hace unos miles de años, docenas de ciudades mesopotámicas estaban armadas hasta los dientes y tenían organizaciones militares que rivalizaban con los gobiernos de los sacerdotes. Es de suponer que el concepto de la realeza surgió cuando los sacerdotes sumerios decretaron que los dioses necesitaban un representante entre los hombres, un alto sacerdote bien armado que dirimiera las disputas o aplastara a la oposición. Poco después las sociedades se unieron bajo la influencia de un rey o un dios, y empezaron a exigir adhesión a esto o aquello, todo con el objeto de decir al pueblo quiénes eran y cuál era su lugar en el escenario universal.

La actual plétora de religiones y filosofías diferentes abona el hecho de que las ideas teológicas y cognoscitivas no están sujetas a la experimentación, por lo que nunca serán universalmente aceptables. Esas ideologías quizá ofrezcan una cierta estabilización, pero, ¿cómo evitar que sean al mismo tiempo desestabilizadoras, en especial a la luz del gran número de sectas contrarias y de puntos de vista discrepantes que existen en nuestro mundo moderno?

La confianza definitiva en la autoridad de la prueba experimental es la característica que distingue claramente al empeño científico de todos los otros sistemas de explicar la naturaleza. Iniciado en la antigua Grecia, y empleado escasamente a través

de los siglos, sobre todo por Aristóteles y San Agustín, el método científico se extendió durante el Renacimiento, convirtiéndose en un criterio autorizado en la búsqueda de la verdad en el Universo físico. Ahora es el único criterio usado para formar el punto de vista del último cuarto del siglo XX sobre la evolución cósmica... no una tradición de dogmas contados al pueblo, sino una serie de descubrimientos puestos a su disposición.

El epítome de la cultura puede muy bien ser la capacidad de buscar la verdad sobre nosotros mismos y nuestro Universo, pero un factor aún más básico de gran importancia es la capacidad que hemos desarrollado de *desear* la búsqueda de la verdad. ¿Qué es exactamente lo que nos permite, lo que nos impulsa incluso, a formular las preguntas fundamentales y a intentar encontrar las respuestas a todas ellas? Es la conciencia, esa parte de la naturaleza humana que nos permite sentir curiosidad, reflexionar, pensar cosas abstractas, explicar... la capacidad de abstraernos, percibir la gran panorámica y meditar sobre la relación que hay entre nuestra existencia y la existencia de todas las cosas.

¿Cuándo se originó la conciencia? ¿Cuándo adquirimos los seres humanos conciencia de nosotros mismos? ¿Es la conciencia una consecuencia natural de la evolución neurológica? Algunos investigadores lo creen así, pero aún no pueden probarlo. Otros ponen reparos y sugieren que es necesario un mecanismo específico, tal vez improbable, para su desarrollo, porque aducen que la facultad de imaginar representa algo más que una simple y continuada acumulación de neuronas.

El registro de la historia antigua es fragmentario y dificulta cualquier intento de documentar los comienzos de la conciencia. Algunos investigadores afirman que la conciencia, tal como la conocemos, no aparece en registros ancestrales hasta hace unos tres mil años, que es precisamente cuando algunos escritos de los textos antiguos adoptan un tono abstracto o reflexivo. Así pues, no existe apenas duda de que los seres humanos se preguntaron sobre sí mismos hace varios miles de años, pero aún no sabemos si lo hicieron por primera vez entonces, o quizá mucho antes. Si la conciencia surgió tan tarde en el tiempo, tendremos que suponer que las culturas pueden llegar a ser muy refinadas sin el desarrollo de la conciencia personal. Nuestros antepasados históricos habrían inventado casi todas las facetas culturales menos la conciencia, y habrían vivido hasta fechas muy recientes en un estado de inconsciencia parecido al sueño.

Otros investigadores opinan por el contrario que la conciencia humana se desarrolló hace mucho tiempo. Si los chimpancés actuales, que muestran una rudimentaria conciencia de sí mismos, saben imitar a nuestros antecesores australopitecos, la conciencia tendría que haber sido un factor hace millones de años. Otra creencia popular es que se desarrolló hace varias decenas de miles de años, con la invención del arco y las flechas. En realidad, la invención de dicha arma de larga distancia podría ser considerada como el paso gigante que dio a los seres humanos la libertad de innovar, de empezar a evolucionar culturalmente, de sentir curiosidad.

Y una hipótesis claramente reconciliadora de estos dos criterios al parecer divergentes sostiene que los seres humanos prehistóricos poseían un tosco sentido de la conciencia hace un millón de años, pero hasta hace poco tiempo no alcanzaron la complejidad suficiente para revelar en sus escritos la curiosidad y la conciencia de sí mismos. Sin embargo, en ausencia de una sólida prueba experimental, hemos de continuar preguntándonos cómo aprendimos a preguntarnos cosas.

El uno por ciento más reciente de la historia humana —los últimos diez mil años— ha presenciado importantes y rápidas innovaciones. Los glaciares se habían retirado, creando ambientes más cálidos y húmedos y permitiendo prosperar a la tierra. Nuestros antepasados cazadores-recolectores se habían diseminado hasta ocupar, aunque escasamente, todas las partes habitables del planeta excepto el Ártico y el Antártico. Y moldeaban utensilios e ideas para aumentar sus posibilidades de supervivencia. Pero entre todos los factores que contribuyeron al rápido progreso de los seres humanos, la invención de la agricultura fue sin duda uno de los más importantes. El cultivo de la tierra facilitó un alimento seguro a la población cada vez más numerosa de la Tierra.

Los cazadores-recolectores se transformaron con bastante rapidez en agricultores, empezando con la domesticación de plantas y animales hace unos diez mil años. Los datos arqueológicos evidencian una serie de nuevos métodos de subsistencia existentes hace ocho mil años. La siembra sistemática y la cría de ganado cerca de las aldeas primitivas permitieron grandes aumentos de la población. No sólo sobrevivían más personas, sino que muchos más emigraban para colonizar todos los rincones del planeta. Las técnicas fundamentales de la agricultura se propagaron como el viento desde poblados asiáticos y mediterráneos, y en especial desde la zona actualmente ocupada por Grecia. Los cazadores-recolectores de todas partes se convirtieron en agricultores y pastores. El cambio reinaba por doquier. El nacimiento de las grandes ciudades y finalmente la industrialización no estaban muy lejos.

El medio ambiente continuó cambiando, aunque no tan lentamente como hubiera querido la naturaleza. Al fin y al cabo, los seres humanos se habían convertido en un factor. Ahora estaban menos a merced del medio que a la inversa, porque los hombres y mujeres habían adquirido cierto dominio sobre la materia. Nuestros antepasados eran ya agentes de cambio.

La civilización estaba en marcha. Había transcurrido muchísimo tiempo desde el origen de la vida, pero ya habían llegado por fin formas de vida manipuladoras y altamente organizadas. Una cosa llevó a otra; los estilos de vida se multiplicaron. Ayudado por sistemas de irrigación próximos a las márgenes de los ríos, el arte de la agricultura se desarrolló de forma espectacular. La población humana se multiplicó rápidamente, en especial en las áreas urbanas ribereñas como el valle del Nilo y el del Tigris y Éufrates en la región que ahora comprende Turquía, Siria e Irak. Se refinaron las artesanías para servir a la población de estas florecientes comunidades: el trabajo de metalistería, la cerámica fina, la construcción naval y la talla de la madera aparecen en el registro arqueológico desde hace seis mil años. Donde están más documentados es en el sudoeste asiático (Oriente Medio), aunque es seguro que este progreso artístico y pragmático se produjo en otros puntos del globo.

Aunque mucha parte de todo esto precedió a la historia escrita, se ha llegado a la conclusión de que las sociedades urbanas y las economías prósperas, así como sistemas complejos sociales y políticos, eran la regla, no la excepción. La agricultura, la industria y el comercio estaban totalmente establecidos hace varios miles de años. Y han continuado progresando hasta nuestro tiempo, el siglo XX.

Procuremos situar en su justa perspectiva los últimos avances de los seres humanos civilizados. Miles, decenas de miles e incluso millones de años tienden a confundirse en un número impreciso a fuerza de barajarlos. Para apreciar mejor el marco temporal de los avances más conocidos de la historia, consideremos la siguiente analogía.

Imaginemos que la vida entera de la Tierra es de cincuenta años, en lugar de cinco mil millones, por lo que cada millón de siglos será un año. Esta escala de tiempo podrá compararse entonces con la duración de una vida humana, haciendo así más comprensibles las características más sobresalientes de la historia terrestre. Dentro del ámbito de esta analogía, podemos decir que no existe ninguna crónica durante casi toda la primera década. A partir de ahí las rocas se endurecieron relativamente deprisa. La vida surgió hace por lo menos treinta y cinco años, cuando la Tierra no tenía más de quince. La edad mediana del planeta es en gran parte un misterio, aunque podemos estar razonablemente seguros de que la vida continuó evolucionando y que las colisiones continentales continuaron formando cordilleras y océanos.

Hasta hace unos seis años, siempre en nuestra analogía de cincuenta años, no floreció una vida abundante en todos los océanos terrestres, y esta misma vida no se trasladó a la orilla hasta hace unos cuatro años. Las plantas con flores y los animales primitivos dominaron en la superficie hace solamente dos. Los dinosaurios alcanzaron su punto estelar hace un año y desaparecieron repentinamente hace ocho meses. Los prosimios se convirtieron en primates la semana pasada, y el último período glacial ocurrió ayer. El *Homo sapiens* no apareció hasta hace unas cuantas horas. De hecho, la invención de la agricultura tiene sólo una hora, toda la historia lleva escrita media hora y el Renacimiento ocurrió hace tres minutos.

En resumen, necesitaríamos un microscopio para ver los hitos de la historia en la escala marcada en las guardas de este libro. Y no obstante, dentro de esta duración microscópica los seres humanos hemos investigado sin descanso, razonado y descubierto muchas cosas acerca de nosotros mismos y de nuestro medio universal.

Durante el último millón de años, la evolución biológica y la cultural han estado inextricablemente mezcladas. Su interrelación es natural, porque el desarrollo de la cultura influye considerablemente sobre el medio; es un factor de primordial importancia que afecta al curso de la evolución biológica. Las innovaciones culturales permitieron a nuestros antepasados inmediatos superar algunas limitaciones ambientales: la cocción les ayudó a adoptar una dieta alimenticia muy diferente de la de los australopitecos, y la ropa y las viviendas les permitieron colonizar regiones de la Tierra más secas y frías.

De modo similar, la presente creatividad cultural nos permite a nosotros, los *Homo sapiens* del siglo XX, desafiar al medio ambiente. La tecnología avanzada nos proporciona medios para volar por el aire, explorar los océanos e incluso viajar lejos de nuestro planeta natal. El cambio acelera su ritmo, y con él, el ritmo de la vida. Al parecer, la cultura es un catalizador que empuja el curso de la evolución hacia un futuro incierto.

Si alguna tendencia ha caracterizado a la evolución de la cultura es probable que sea la creciente habilidad para extraer energía de la naturaleza. En el transcurso de los últimos diez

mil años, los seres humanos han dominado la rueda, la agricultura, la metalurgia, las máquinas, la electricidad y la energía nuclear. Pronto dominarán la energía solar. Cada una de estas innovaciones ha canalizado mayores cantidades de energía hacia la cultura. De hecho, la habilidad para aprovechar más fuentes de energía es el distintivo de la sociedad moderna. Y es también, en principio, la forma de continuar evitando el caos y ordenando la vida en el planeta Tierra, soslayando así las leyes fundamentales de la termodinámica. Pero en la práctica es asimismo la causa de muchas complejidades sociopolíticas en que los seres humanos del siglo XX nos vemos inmersos desde hace algún tiempo.

ÉPOCA SÉPTIMA

EL FUTURO

¿DESCANSO O PROGRESO?



miles de millones de años

Los seres humanos son en la actualidad la inteligencia dominante en el planeta Tierra. Somos la única especie capaz de comunicarse culturalmente y construir tecnológicamente. Somos los únicos capaces de conocer nuestro pasado y preocuparnos por el futuro. Sin embargo, hasta qué punto somos inteligentes es una cuestión bastante dudosa.

¿A dónde iremos a partir de aquí? ¿Cuál es nuestro futuro? Aunque no se trata de preguntas fáciles, por lo menos sabemos una cosa: Nuestro Sol está destinado a quedarse sin combustible, hincharse hasta convertirse en una estrella gigante roja y engullir a varios de sus planetas, quizá incluso a la Tierra. Tal será sin duda alguna el fin de la civilización en nuestro Sistema Solar.

Por otra parte, el Sol no perecerá hasta dentro de otros cinco mil millones de años, un lapso de tiempo tan remoto como para ser casi incomprensible. Desde luego ofrece muchas oportunidades a la vida terrestre, si es que perdura, para emprender proyectos de ingeniería galáctica y otras grandes aventuras literalmente fuera de este mundo.

¿Y qué hay de escalas de tiempo más reducidas, como un millón, mil o incluso unos pocos centenares de años en el futuro? ¿Es posible predecir la evolución del *Homo sapiens* en su ruta por la flecha cósmica del tiempo?

No cabe duda de que sería una vanidad y una pretensión infundada considerarnos el producto final del cambio universal, el pináculo de la evolución cósmica. El cambio ha acompañado al paso del tiempo desde el mismo principio del Universo. Sólo

porque la vida tecnológicamente inteligente ha conseguido dominar un único planeta, no hay razón para pensar que el cambio va a detenerse aquí.

El cambio ha de continuar para siempre si queremos sobrevivir como civilización. Cambiar o morir; tal es el código vital para la continuada viabilidad de toda la materia, incluida la vida.

El futuro es un tema difícil. Hacer comentarios sobre él es correr el riesgo de no decir nada concreto. Resulta difícil sobre todo predecirlo en relación con la vida. En realidad, predecir el destino de nuestra civilización es más complicado que vaticinar el destino del Universo. Puede parecer ridículo, pero es cierto que podemos saber más cosas sobre el futuro del Universo en general que sobre el futuro de la vida en nuestro propio planeta. Y es que la vida tiene mucho peso en nuestra civilización, mientras que en todo el Universo carece de importancia; y así como el Universo obedece a las leyes de la física, la civilización promulga sus propias leyes.

El destino del Universo depende de una sola cosa: la densidad de su masa, un término que los científicos pueden definir y cuya cantidad están ahora tratando de estimar. El destino de nuestra civilización también parece depender de un solo término. Pero este término es la *humanidad*, una expresión muy general aparentemente imposible de cuantificar. Incluso la naturaleza de la humanidad es difícil de comprender a fondo. El diccionario Webster la define como la «cualidad de ser humano; los sentimientos bondadosos, los estados de ánimo y las simpatías de los seres humanos».

Hay otro modo de vislumbrar el enigma del futuro. Como ya hemos observado, el trabajo del físico es comprender la naturaleza lo bastante bien como para poder predecir la reacción de la materia a una serie de circunstancias. La trayectoria en el aire de una pelota de béisbol, por ejemplo, es ya comprendida con exactitud. Conociendo la masa de la pelota, la masa de la Tierra, las fuerzas gravitacionales que hay entre ellas, la resistencia del aire, el momento y la rotación de la pelota, y otros pocos factores físicos que afectan a la pelota, los científicos pueden pronosticar con total precisión la trayectoria futura de este trozo de materia a través del espacio. Sin embargo, predecir la «trayectoria» de la *vida* a través del *tiempo* es un problema mucho más difícil. Hay involucrados demasiados factores no físicos: la sociología individual y de grupo, la política nacional e internacional, el comportamiento biológico y cultural y un sinnúmero de

otros parámetros incuantificables, todos los cuales influyen el futuro de la civilización.

Pretender conocer los caminos que recorrerá a partir de ahora la evolución cósmica es casi equivalente a aventurarse en la ciencia ficción. No obstante, se pueden examinar ciertas condiciones límite que afectarán al futuro de la vida terrestre. Estas condiciones límite representan riesgos de naturaleza global: factores ambientales, decisiones políticas, sanciones económicas, efectos secundarios de la tecnología, y todo un conjunto de circunstancias destinadas a producir un impacto adverso sobre el futuro de nuestro mundo cada vez más reducido.

He aquí cuatro ejemplos de límites que debemos evitar a fin de sobrevivir como civilización:

La superpoblación, con sus ineludibles secuelas de escasez de alimentos y energía, causará un efecto negativo incluso aunque continúe a tasas de crecimiento reducidas. Este es un ejemplo de un problema causado por las acciones de muchas personas y cuya gravedad podría ir acentuándose gradualmente.

La autodestrucción podría tener como resultado una tremenda supresión o incluso la exterminación de la vida en la Tierra. Este tipo de problema podría ser causado por las acciones de muy pocas personas y, en forma de holocausto nuclear, por ejemplo, nos ocurriría de una manera casi instantánea.

La degeneración genética es una condición límite representativa que podría llegar a intensificar muchas de las cualidades perjudiciales de la vida terrestre. Considerada en un tiempo como parte de la ciencia ficción, o al menos de un futuro remoto, la potencialidad de este problema es real y podría empezar a mostrar sus temibles consecuencias antes de lo que pensamos.

Y finalmente, los circuitos basados en el silicio —computadoras— están incrementando sus dotes a un ritmo inesperadamente rápido. Aunque nadie puede asegurarlo, es posible que las computadoras amenazaran algún día con subyugarnos, quizá enviándonos incluso hacia el camino de la extinción recorrido ya por el noventa y nueve por ciento de las formas de vida terrestres.

No es probable que estas condiciones límite sean peculiares del planeta Tierra. Algunos de estos problemas, tal vez todos, tendrán que ser afrontados por todas las posibles civilizaciones existentes en el Universo, si es que existe en alguna parte una vida inteligente extraterrestre.

Sin referirnos a nuestras perspectivas de supervivencia final (esto depende en gran parte de la verdadera naturaleza de la humanidad), trataremos las implicaciones de cada una de estas

crisis potenciales, junto con algunos de los cambios requeridos para soslayarlas.

La superpoblación es un concepto difícil de apreciar para muchas personas, en especial para los que vivimos en países «desarrollados». Todos reconocemos que hay muchos habitantes en la Tierra, casi cinco mil millones en la actualidad. Se trata de un número muy elevado, pero por otra parte, el planeta es muy grande, así que, ¿cuál es el problema? El problema es que la población mundial no es estable. Como todo lo demás, la población cambia, y actualmente cambia hacia un incremento que se produce con mucha más rapidez de lo que piensa la gente y de lo que la Tierra puede tolerar.

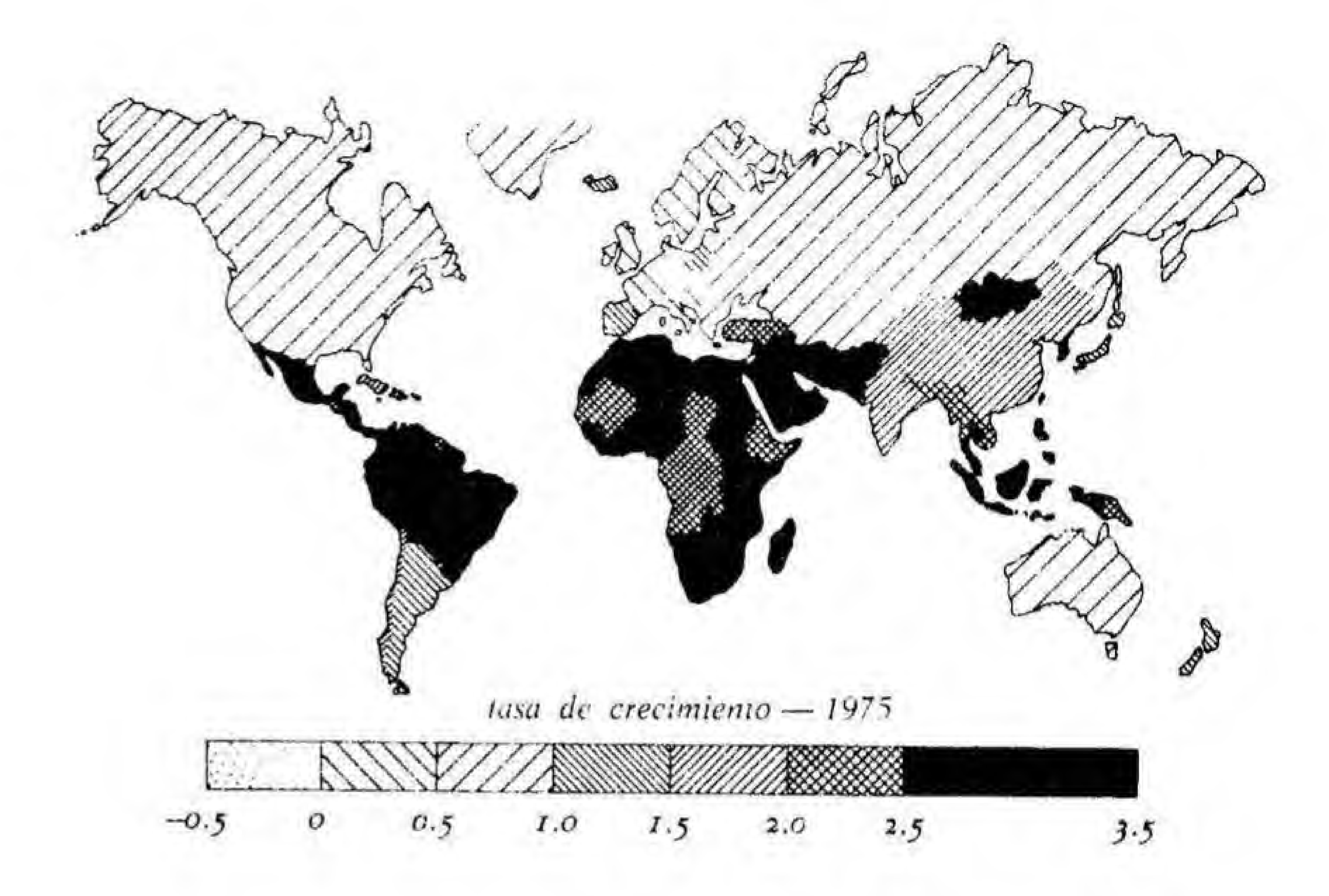
Puesto que es imposible que un ser humano cuente hasta mil millones durante su vida, no es fácil apreciar la magnitud de semejante número de habitantes, para no hablar de la multitud de otras formas de vida en el planeta Tierra.

Aun así, es posible valorar un poco el problema de la población considerando su densidad. Como ya hemos especificado la densidad de casi todo lo existente en el Universo, ¿por qué no computar también la de la vida humana? Esta densidad se define como el número total de personas que pueblan una determinada superficie.

En Australia y Canadá, donde aún quedan vastas extensiones de tierra deshabitada, un kilómetro cuadrado es ocupado por un promedio de dos individuos. En la Unión Soviética, la mayor nación del mundo, la densidad es de unos doce habitantes por kilómetro cuadrado. Estados Unidos y Europa tienen respectivamente un promedio de casi veinticinco y ochenta personas por kilómetro cuadrado. Y en algunos países asiáticos, India y Japón, por ejemplo, la densidad de población llega a los doscientos (India) y trescientos habitantes por kilómetro cuadrado.

Pero se trata de promedios y, como tales, no son demasiado informativos. ¿Por qué? Pues porque las personas no están repartidas uniformemente por todo el globo. Como todos los tipos de materia, la vida tiene tendencia a agruparse. En la Tierra, tres cuartas partes de la vida humana están amontonadas en sólo el dos por ciento del suelo. En las ciudades, la densidad de población es mucho mayor. Por ejemplo, en Boston, en los cinco distritos de Nueva York y en Manhattan a mediodía hay, respectivamente, cinco mil, diez mil y cuarenta mil habitantes por kilómetro cuadrado.

Estas cantidades revelan algo de la concentración de la especie humana en la Tierra actual. En sí y de por sí no representan una verdadera amenaza; la Tierra puede mantenernos. El problema, como ya hemos observado, es que la población mundial no está ni mucho menos estabilizada.

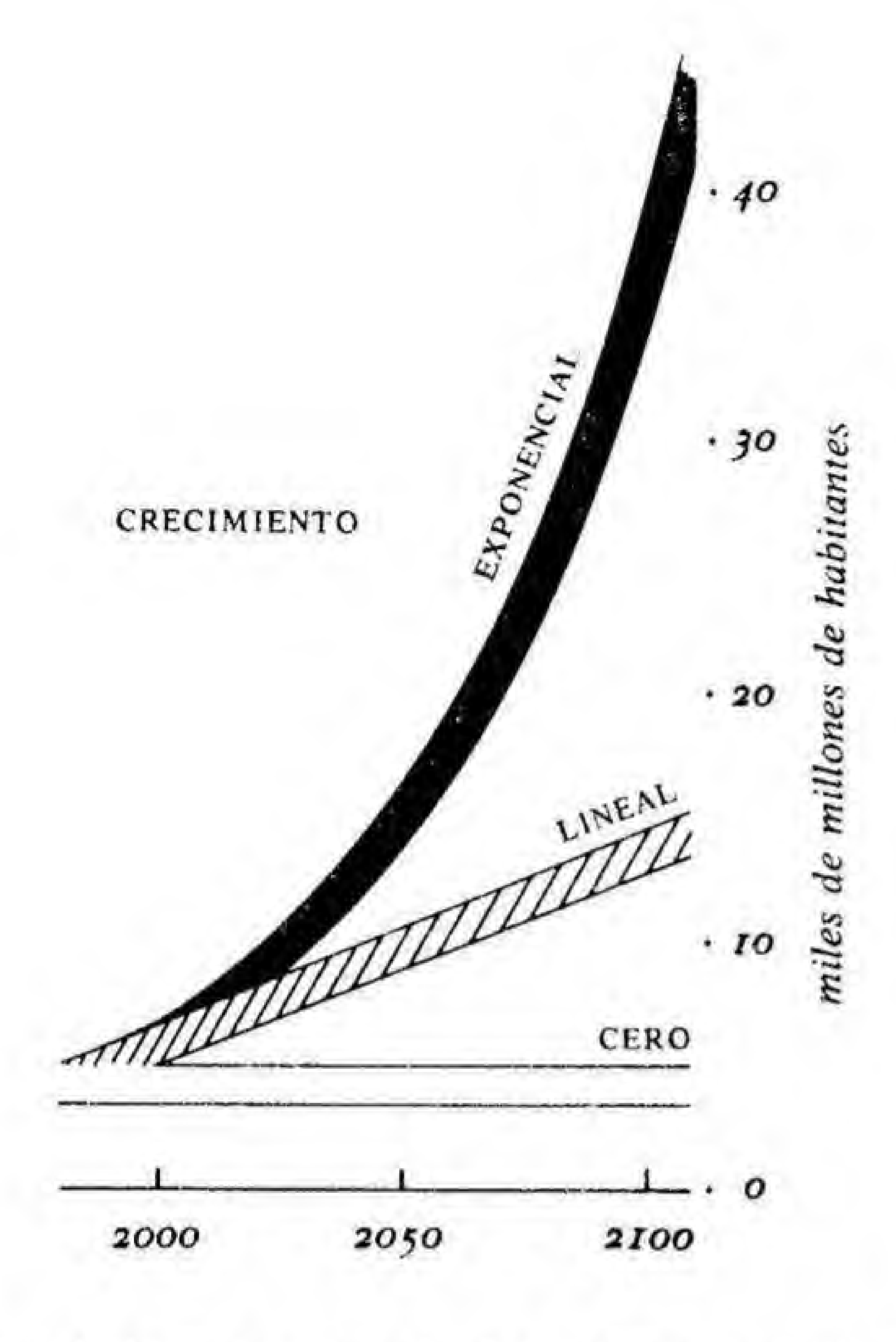


Todos los años producimos un incremento neto de casi ochenta millones de personas. Esta estimación tiene en cuenta las tasas actuales de nacimientos y defunciones, y no es una cantidad desdeñable. Equivale a añadir anualmente a la Tierra una tercera parte de toda la población de Estados Unidos.

Una población mundial de casi cinco mil millones, y un incremento anual de ochenta millones de recién llegados, significa una tasa de crecimiento anual de casi un dos por ciento. El hecho de que la tasa de crecimiento haya disminuido en los últimos años en Estados Unidos, Canadá y varios países de Europa occidental afecta poco al problema de la superpoblación; Norteamérica y Europa occidental unidas albergan apenas al quince por ciento de la población mundial. La tasa de crecimiento continúa elevada en el Hemisferio Sur.

¿Cuáles son las implicaciones generales del crecimiento continuado de la población mundial? Examinado en su conjunto, hay una serie de situaciones teóricas posibles.

Si la tasa de crecimiento anual continuara constante, la po-



blación mundial se incrementaría uniformemente, produciendo un aumento lineal de la población que, por ejemplo, dentro de cinco siglos alcanzaría aproximadamente los cuarenta mil millones de personas. Esta decuplicación de la población aumentaría en diez veces las densidades actuales. Quinientos años parecen un tiempo muy largo, y de hecho es mucho más largo que una vida humana normal, pero es sólo un parpadeo en el esquema cósmico.

Tiene importancia observar que un crecimiento constante no significa una población constante, aunque se trata de una confusión muy común. Significa exactamente esto: *crecimiento* constante. Sólo el crecimiento cero garantiza una población mundial completamente estabilizada en que el número de nacimientos equivale al de las muertes.

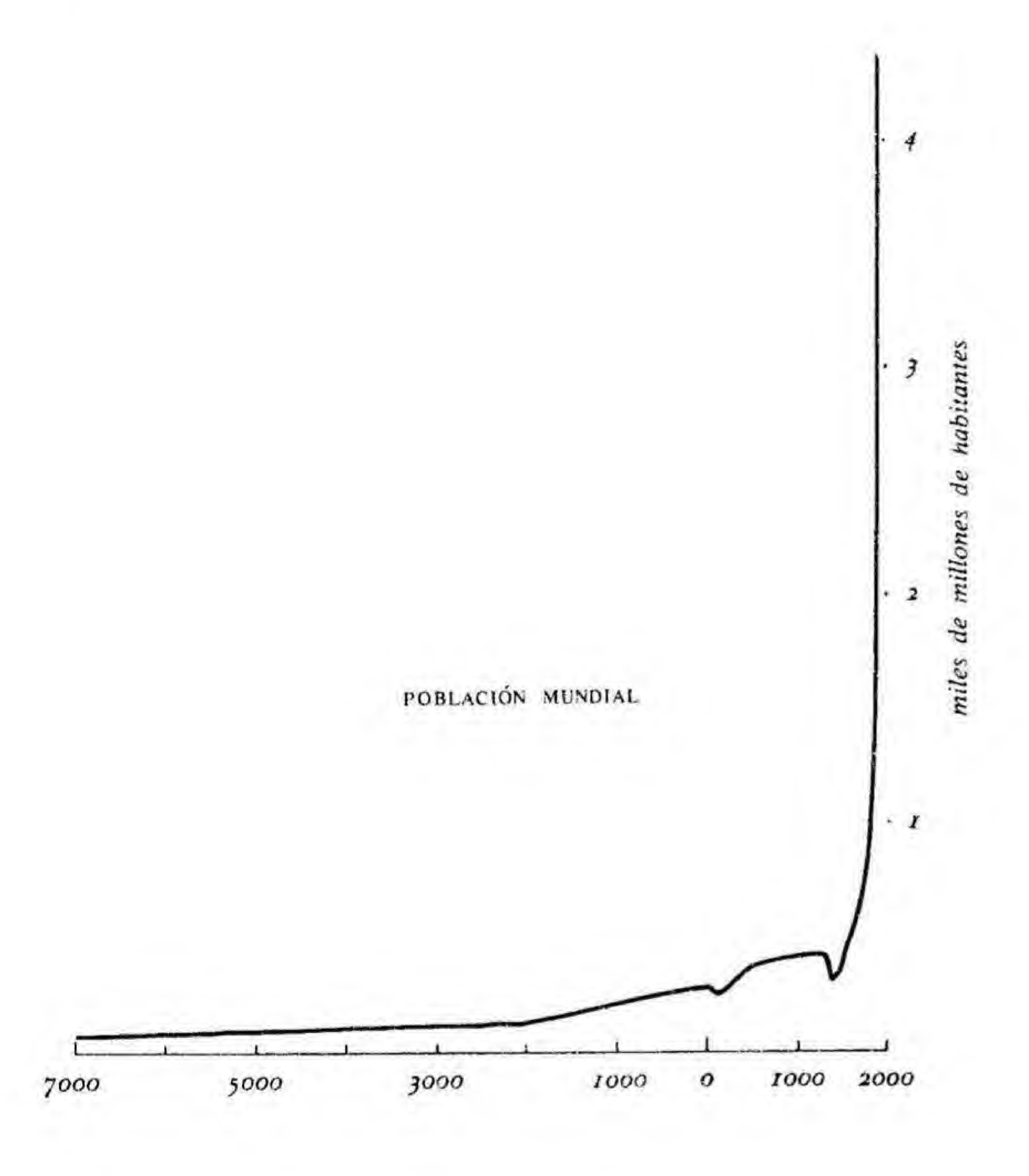
También es posible un aumento de población más rápido que el crecimiento lineal. Por ejemplo, un aumento exponencial, que se iniciaría con lentitud, pero alcanzaría luego al crecimiento lineal y ascendería considerablemente más deprisa que éste.

El crecimiento exponencial puede llamarse también crecimiento explosivo. Se acerca a hurtadillas, aumenta gradualmente durante largo tiempo y por fin se dispara, alcanzando un aumento espectacular en un breve plazo de tiempo. En el caso de la población, un desarrollo de esta índole significaría un incremento constante de la población mundial durante el curso de miles de años, seguido de un aumento repentino y fenomenal durante el curso de unos siglos o incluso décadas... una verdadera explosión demográfica. Por ejemplo, un crecimiento exponencial de un dos por ciento predice una población de más de cien billones para dentro de cinco siglos, mucho más de lo previsto por el análisis del crecimiento lineal.

Estas son, pues, la tres posibilidades generales de incremento de cualquier cosa, población o lo que sea: crecimiento cero, lineal o exponencial. Sin embargo, los datos demográficos actuales no parecen corresponder a ninguna de estas posibilidades. ¡El examen de la situación real en la Tierra revela que la población ha aumentado a un ritmo todavía más rápido que el crecimiento exponencial!

Una vista global de los datos censales correspondientes a los últimos miles de años nos obliga a concluir que los seres humanos se encuentran ya dentro de los límites del incremento catastrófico de población. (La persecución de los cristianos y la peste representan las únicas reducciones importantes del incremento de la población mundial en toda la historia escrita.) El culpable vuelve a ser la tasa de crecimiento anual. Considerada desde una perspectiva de miles de años, la tasa de crecimiento anual no ha permanecido constante ni ha aumentado linealmente; ha subido de modo espectacular durante el último siglo. Por ejemplo, durante los últimos miles de años, la población se ha doblado muchas veces, y cada vez con mayor rapidez. Se dobló y alcanzó los doscientos millones de personas desde el año 5000 a.J. al año 1 A.D., o sea un período de cincuenta siglos. La vez siguiente se dobló en un tiempo considerablemente menor, catorce siglos. En 1800, sólo cuatro siglos después, la población volvió a doblarse. Los períodos sucesivos han continuado acortándose, descendiendo a cien años a principios del presente siglo, sesenta años a mediados de siglo y unos cuarenta en la actualidad. Estas reducciones espectaculares de los períodos en que se duplica la población indican nada menos que un crecimiento auténticamente explosivo.

Otra manera de contemplar el crecimiento de la población es observando que, de todos los seres humanos que han vivido en este planeta, el cinco por ciento está vivo en la actualidad. Dentro de dos décadas, este porcentaje se habrá doblado.



Dado el tamaño finito del planeta Tierra, no cabe duda de que este incremento de población tan extraordinariamente rápido es perjudicial para la vida. Si esta proliferación de seres humanos continúa a semejante ritmo, el desastre será la consecuencia inevitable. Pero, ¿continuará? Por rutina muchos contestan que no, que es imposible. Sin embargo, ¿por qué están tan seguros de que este problema no acabará siendo absolutamente ingobernable?

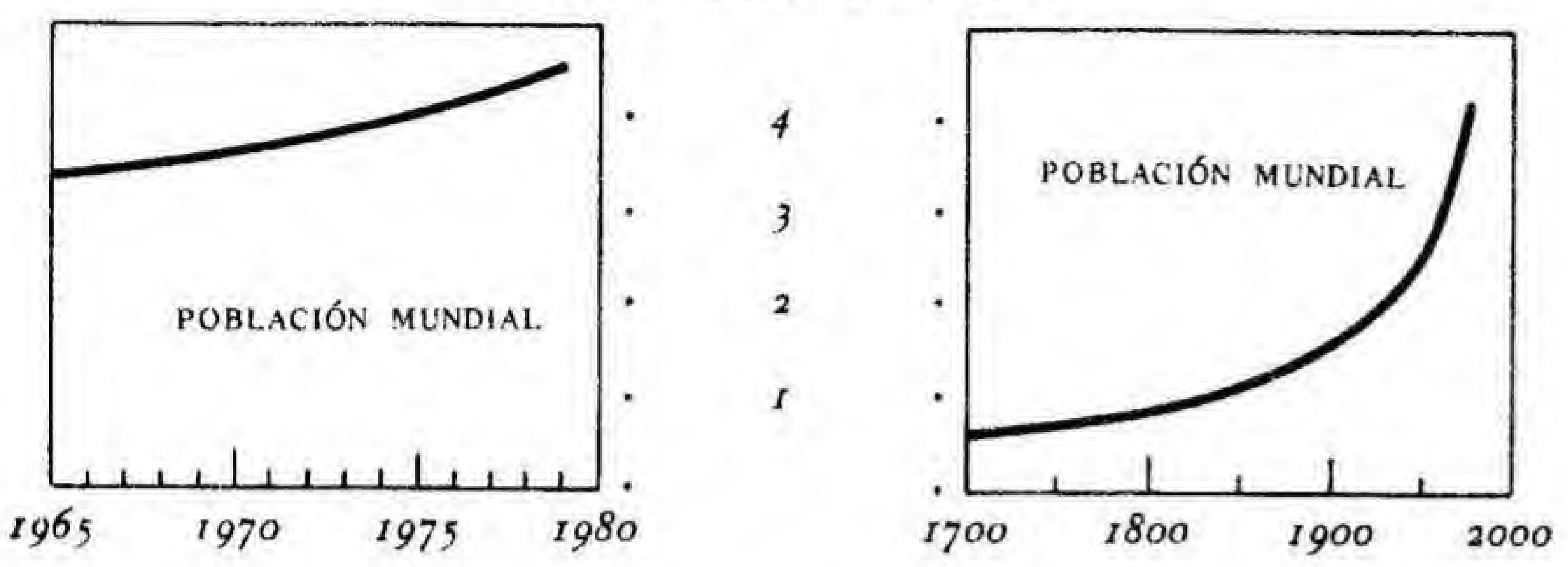
Merece la pena subrayar dos puntos. Primero, algunos demógrafos sostienen que las perspectivas de superpoblación no son tan sombrías como las presentadas aquí. Afirman que la tasa de crecimiento anual ha alcanzado ya su cota máxima y el problema está bajo control. Algunos indicios sugieren efectivamente que la tasa de crecimiento mundial está disminuyendo, pero es difícil saberlo con seguridad, ya que las cifras del censo suelen ser poco exactas en muchos de los países densamente poblados de Asia e Hispanoamérica.

Las actuales estadísticas de población son bastante confusas. Por ejemplo, se han anunciado importantes descensos de la tasa de crecimiento durante el año pasado en Costa Rica, Sri Lanka, Corea del Sur, Fiji, Indonesia, Panamá, Colombia, República Dominicana, Malasia y Tailandia. Muchos creen que esto significa la eliminación del problema, pese al hecho de que todos estos países albergan solamente al cinco por ciento de la población del planeta. De hecho, la mayoría de comunicados de prensa sobre el estudio de las Naciones Unidas correspondiente a finales de la década de 1970 ostentaban el titular: «El descenso de la población mundial documentado.» Esto son tonterías. La población mundial no ha disminuido, tampoco en los países mencionados. No se ha estabilizado siquiera, sino que continúa aumentando, y además, rápidamente.

Una *tasa* menor de crecimiento sigue significando crecimiento y no hace más que postergar los problemas. Por ejemplo, una tasa de crecimiento anual del uno y medio por ciento predice la duplicación de la población cada cuarenta y siete años, sólo una docena más que la de la tasa del dos por ciento considerada más arriba. Incluso una tasa de crecimiento de sólo dos terceras partes del uno por ciento haría que la población se doblara cada cien años. Estas escalas de tiempo no son largas según el esquema cósmico. Para evitar el problema del exceso de población, la tasa de crecimiento debe disminuir sustancial y permanentemente.

Un segundo punto: es fácil dejarse confundir por ingeniosas presentaciones de datos demográficos, e incluso por cualquier





clase de datos estadísticos. Cuando se examinan las cifras censales de unos pocos años o unas pocas décadas, el problema demográfico da la impresión de desaparecer. El «pequeño cuadro», a veces conocido como el «complot del político» a causa de la miopía de casi todos los funcionarios elegidos para un solo mandato, revela un incremento constante, pero no espectacular, de la población mundial. Pero si se contempla un gráfico correspondiente al curso de varios siglos, es fácil comprender toda la magnitud del problema. Este «gran cuadro» da una impresión totalmente distinta, ya que predice un incremento de población realmente fantástico para dentro de pocos siglos.

Hemos de buscar siempre la perspectiva del gran cuadro y no dejar que los árboles de los expertos en estadística nos oculten el bosque. Las tendencias a corto plazo ofrecen muy poca información, especialmente a escala cósmica. Aparte de la cantidad considerada, exijamos siempre la historia completa del cambio operado en el máximo plazo de tiempo posible. No hay nada que perder y seguramente mucho que ganar con el examen de un dilatado espacio de tiempo, ya que es el único modo de contemplar la repartición panorámica de la materia a través del tiempo.

Las implicaciones de un crecimiento continuado a ritmo exponencial o todavía más rápido, son sencillas. Todo apunta hacia una catástrofe, y sólo los locos y algunos economistas piensan lo contrario. El crecimiento prolongado a lo largo de la porción «explosiva» de la curva ascendente —la porción donde nos encontramos ahora— predice que la población mundial se acercaría teóricamente al infinito dentro de mil años.

¿Tiene sentido una población infinita? Claro que no. La población nunca podría llegar a ser infinita. El tamaño del planeta Tierra es finito y es imposible imaginar siquiera una población infinita, del mismo modo que es imposible apreciar densidades infinitas dentro de un agujero negro o un volumen infinito para el Universo abierto. Los números infinitos son inalcanzables.

Al hablar de cantidades físicas que se acercan teóricamente al infinito, los científicos quieren decir que en la actualidad somos incapaces de explicar las propiedades que caracterizan a la densidad o el volumen infinito. Al describir valores infinitamente pequeños o grandes, las leyes de la física, tal como ahora las conocemos, nos fallan.

En el caso del crecimiento de la población, es seguro que algo nos va a fallar, pero no serán las leyes de la física. Mucho antes de que la población mundial se acerque al infinito, la propia humanidad perecerá en el desastre.

En resumen, necesitamos con urgencia una verdadera reducción del crecimiento de la población mundial si queremos evitar un problema monumental para un futuro no muy remoto. Es indudable que se producirá semejante cambio; lo que nos preocupa es cómo va a ocurrir. O bien lo conseguimos con un hábil esfuerzo, o las penalidades maltusianas caerán sobre nosotros.

Deberíamos subrayar lo del *cambio* y el *ahora*. Necesitamos un cambio y lo necesitamos inmediatamente. Debido a nuestra posición en la parte explosiva de la curva de población, el tiempo presente es crucial. Es nuestra generación —no la siguiente— la que tiene que efectuar un cambio controlado, a fin de que no nos sobrevenga en forma de guerra, epidemias y hambre. Y el mejor modo de efectuar este cambio es contemplando el panorama en su conjunto, conociendo la existencia del problema y alterando finalmente la actitud de gobiernos, religiones y sociedades.

Es natural preguntarse si la emigración al espacio podría ayudar a resolver el problema demográfico del mundo. Si la superpoblación es resultado del tamaño limitado de la Tierra, ¿por qué permanecer aquí? Después de todo, los navegantes del Renacimiento mitigaron el problema de la superpoblación europea descubriendo las Américas, Australia y otras tierras nuevas. Ahora que el planeta entero parece abocado al hacinamiento global, ¿por qué no encuentran los astronautas modernos otras estrellas dotadas de planetas habitables para que los terrícolas puedan emigrar y establecerse en ellos?

Aunque abogada por algunos, esta solución es absurda. La expansión interestelar es muchísimo más difícil de lo que imaginan muchos. Hoy por hoy, los científicos no conocen ninguna estrella efectivamente provista de planetas, e incluso aunque co-

nociéramos semejante sistema solar, y tuviéramos la suerte de que se encontrara próximo a nosotros, continuaría siendo demasiado remoto para explorarlo con nuestros medios actuales. La idea de enviar allí a ingentes cantidades de personas para aliviar la superpoblación terrestre es otro problema. No cabe duda de que la emigración interestelar es de momento totalmente imposible, y todos los análisis de técnicas futuristas de vuelo espacial basadas en las leyes físicas conocidas sugieren que probablemente no será factible jamás.

A falta de planetas disponibles, algunos investigadores han propuesto la construcción de grandes colonias espaciales. Sus diseños sobre papel han dado a tales colonias una gran variedad de configuraciones geométricas, como tubos, anillos, esferas y diferentes formas de poliedros. En general, estas colonias serían enormes recintos de acero y vidrio que oscilarían entre los dos y los treinta kilómetros de envergadura. Puestas en órbita, estas glorificadas cajas de hojalata pueden desarrollar una fuerza centrífuga semejante a la discutida anteriormente en el caso de protogalaxias y protoestrellas. Como se supone que los habitantes vivirían en el *interior* de las cajas, esta presión hacia fuera los adosaría a las paredes, en una simulación de la gravedad, permitiéndoles vencer la ausencia de peso que se encuentra normalmente en el espacio exterior.

Las propuestas que pueden verse ahora en las pizarras imaginan a centenares de miles, incluso a millones, de personas en una sola colonia. Residirían allí durante toda su vida en un medio ambiente controlado que cubriría ostensiblemente todas sus necesidades.

Una asombrosa cantidad de personas, incluyendo a un sorprendente número de científicos, se han entusiasmado con la idea de montar y colonizar numerosas estaciones espaciales en la vecindad de la Tierra y aún más lejos. Sin embargo, no cabe duda de que presentarían importantes problemas de naturaleza técnica, sociológica e incluso filosófica.

Sólo la construcción sería enormemente difícil. El aluminio y el silicio para la estructura de metal y vidrio de la colonia podría extraerse tal vez de la Luna, como ha sido propuesto. Pero aún no se sabe cuánta materia prima sería necesaria para construir una sola colonia, en especial teniendo en cuenta la integridad estructural requerida para mantener un medio ambiente estanco y proteger a los habitantes de una letal radiación cósmica. Muchos ingenieros sugieren que se necesitarían casi mil millones de toneladas de material para una colonia normal, un tonelaje mayor que el de todos los barcos de todas las Marinas del mundo. Si están en lo cierto, dada la abundancia de aluminio, silicio y oxígeno existente en el suelo lunar, la extracción de materias primas para una sola colonia requeriría excavar gran parte de la superficie de la Luna hasta casi un metro de profundidad. La colonización espacial sería, sin exagerar, un trabajo de ingeniería de proporciones colosales.

Y la vida en una colonia espacial tampoco sería un juego de niños. Algunos de los planes prevén tantos habitantes en una colonia media, que la densidad de población podría exceder a la de Hong Kong. E incluso con densidades menores, nadie sabe cuáles serían las consecuencias psicológicas y fisiológicas de pasar la vida entera en una colonia espacial en rotación. Viajeros avezados sienten molestias de vez en cuando por el simple hecho de estar varias horas confinados en un avión comercial. Incluso a profesionales de la flota submarina llega a agobiarles el aislamiento de varias semanas en un medio artificialmente hermético que les ofrece casi todas las comodidades. Una estancia de setenta años en una colonia espacial en rotación podría requerir facultades de adaptación excepcionales.

La necesidad de rigidez estructural conduce a más problemas sociológicos, y la seguridad absoluta sería el primero de ellos. Aparte de amenazas externas de sabotaje o de conflictos intercoloniales, los peligros internos permanentes podrían hacer muy vulnerables a las colonias espaciales. Por ejemplo, la presión torsional en las paredes exteriores de muchas colonias se aproximaría al límite estructural... de hecho, sería tan grande, que cualquier proyectil podría romper una pared de cristal al más ligero impacto, quizá abriendo una brecha a todo lo largo de la colonia espacial, anulando así el ambiente presurizado. ¡El resultado sería una auténtica explosión de la población, o al menos una rápida evacuación de todos los habitantes! Por ello habría que prohibir toda clase de proyectiles, incluyendo el juego de béisbol y otras actividades, y naturalmente, las rebeliones, como también las armas de fuego o las bombas, lo cual no es mala idea en y por sí misma. Pero a fin de asegurar la absoluta eliminación de bombas, que podrían significar la muerte de la colonia, las sociedades espaciales se verían obligadas a prohibir la práctica de la química. Y esto implica la prohibición de libros. Los adversarios de esta idea califican a las colonias espaciales de «colmenas huxleyanas», «cajas bradburyanas», «cobertizos de Orwell» o simplemente de tubos totalitarios.

Tal como están ahora en sus esbozos iniciales, las colonias espaciales son, según el observador, nuevos vehículos de vida o lujosas trampas de muerte. ¿Existe una actitud intermedia entre estos dos extremos? Tal vez no, porque las colonias espaciales presentan además un dilema filosófico.

Estas colonias exigen una aventura totalmente inédita: colocar algo donde no existe nada. Están diseñadas para contener un

ambiente respirable y templado en el que habitarán muchos seres humanos en total reclusión. La colonia en sí no es tan extraña al espacio como el intento de crear un medio permanente donde antes no existía. El espacio exterior es lo más cercano a un vacío perfecto, aunque alberga una radiación escasa, pero letal. Cualquier intento de crear un hábitat permanente donde no hay esencialmente nada es algo nuevo y único frente a cualquiera de nuestros modos de vida en la Tierra. Nuestro aire no está embotellado a presión, nuestro medio no tiene calefacción artificial. Habitamos la superficie de una roca cuyo medio se conserva naturalmente intacto en virtud de la gravedad. Los planetas no carecen de problemas, pero su medio ambiente se basa en cimientos *naturales*, en bases sólidas suministradas por la naturaleza. En realidad, quizá los planetas sean los únicos objetos capaces de mantener ambientes permanentes, seguros y habitables.

Estas críticas no se refieren a todos los tipos de construcción en el espacio exterior. El espacio es perfecto para las estructuras ligeras: antenas gigantes para comunicaciones eficaces, baterías solares para proveer de energía a nuestra civilización, observatorios astronómicos para mejorar nuestra percepción del Universo. Suspendidas en la escasa gravedad de su medio espacial, estas estructuras hechas por el hombre requieren poca rigidez, ya que no existen fuerzas netas aparte de la constante brisa de partículas procedentes del Sol. Fabricadas con láminas de aluminio, estas tenues estructuras serían relativamente baratas, desechables y, sobre todo, realistas.

Exploramos los océanos, pero no vivimos en ellos. Investigamos las regiones polares, pero ninguna comunidad permanente y autosuficiente ha establecido allí su residencia. Viajamos a la estratosfera, pero nadie la habita. Pues bien, exploremos el espacio y viajemos por él, pero aplacemos, quizá de modo definitivo, los intentos de colonizarlo.

Una cosa es segura: las colonias espaciales no podrían resolver el problema demográfico ni ningún otro problema de nuestra civilización. Aunque algunos de sus partidarios sostienen que la emigración interestelar podría aliviar el problema del crecimiento de la población terrestre, un simple cálculo nos demuestra que este punto de vista es absurdo. El actual incremento anual de casi ochenta millones de personas se puede expresar también como un incremento diario de unas doscientas mil, que es la capacidad de las colonias espaciales medias que ahora se planean en la pizarra. Sólo neutralizar el actual crecimiento de la población mundial requeriría la construcción diaria de uno de estos gigantescos hábitats, además del lanzamiento diario desde la superficie de la Tierra de doscientas mil personas.

No servirá de mucho que nuestra civilización alcance milagrosamente en el futuro la tecnología avanzada para construir de la noche a la mañana flotas enteras de colonias espaciales. Para causar algún impacto en la población mundial, dichas colonias tendrían que construirse y estar listas para la ocupación antes de que lleguemos a la parte casi vertical de la curva demográfica. No tenemos colonias espaciales, y las necesitamos ahora. Parece improbable que consigamos alguna vez la tecnología y los recursos necesarios para exportar siquiera una pequeña parte de la población mundial.

Es probable que el exceso de población no sea un problema exclusivo de la vida inteligente terrestre. Las razones fundamentales para la superpoblación parecen ser universales y sugieren que cualquier forma de vida inteligente de cualquier otro planeta tendría un problema parecido cuando alcanzara nuestro nivel de desarrollo. Biológicamente hablando, ninguna forma de vida puede aumentar su inteligencia a un ritmo superior al del aumento de su población, lo cual la deja sin preparación para emigrar al espacio exterior cuando se llegue al exceso de población. ¿Cómo podemos estar seguros de esto sin conocer la sociología de los seres galácticos? La razón es que la causa fundamental de una explosión demográfica tiene poco que ver con la sociología.

La superpoblación es resultado del modo en que está estructurada la materia o, más exactamente, de la secuencia de descubrimientos por la que cualquier forma de vida inteligente ha de pasar para desentrañar dicha estructura. El crecimiento espectacular de la población es en gran parte resultado del descubrimiento y la utilización de las bacterias... en el caso de la Tierra, a través de la supresión de la enfermedad. Por otra parte, la capacidad de construir grandes colonias espaciales y en particular, de viajar hasta remotos sistemas estelares depende del descubrimiento y utilización de los núcleos atómicos. Como las bacterias terrestres son invariablemente de mayor tamaño que los núcleos atómicos, y puesto que es presumible que la materia tenga en otras partes una estructura similar, las células siempre serán descubiertas antes que los átomos, y por ello la invención de la medicina precederá siempre a la de la tecnología nuclear. Así pues, las formas de vida inteligente de cualquier planeta parecen destinadas a padecer un exceso de población antes de poder resolverlo mediante la emigración interestelar.

La superpoblación es un problema, no solo porque reduce el espacio para los habitantes de la Tierra, sino también porque reduce los recursos de nuestro planeta, tanto los renovables como los irrenovables. Es causa asimismo de una larga serie de necesidades, la de alimentos en primer lugar. De hecho, algunos investigadores afirman que la escasez de alimentos es el modo natural de frenar el crecimiento demográfico. Citando estudios biológicos, observan que un límite en el suministro de alimentos causa la estabilización del crecimiento reproductivo de los microorganismos después de un activo periodo de incremento exponencial. Es cierto, desde luego, ¿pero acaso la limitación del suministro alimentario es un modo inteligente de conseguir la estabilización? La desnutrición e incluso el canibalismo podrían servir para las bacterias de un tubo de ensayo, pero son soluciones inaceptables para el problema de la superpoblación. Al menos teóricamente, los seres humanos deberían poseer la suficiente inteligencia para mejorar la solución natural de muerte por inanición o depredación. En la práctica, hemos de superar a las bacterias, porque los países que sufran hambre y posean armas nucleares no van a permanecer inactivos. No sea que quienes abogan por el hambre o la guerra como solución natural del problema demográfico estén manifestando esa huidiza cualidad que es el humanitarismo.

La gravedad de la escasez actual de alimentos puede apreciarse observando que casi tres cuartas partes de la población de la Tierra habita actualmente países subdesarrollados donde dilatadas regiones son afectadas de modo regular por hambres periódicas. Pese al hambre reinante en numerosísimos lugares de nuestro globo, la actual producción alimentaria de los países del mundo es suficiente para alimentar a todos los habitantes del planeta. El problema radica en que un veinte por ciento de todos los alimentos elaborados industrialmente se pierde a causa de un almacenamiento deficiente o por simple despilfarro.

Así pues, el hambre actual podría ser aliviada por una distribución racional de alimentos alrededor del mundo. Pero el problema irá de mal en peor, ya que no es probable que la producción alimentaria avance al mismo paso que la población.

La mayoría de personas capaces de leer este libro no se preocupan del problema alimentario, primero porque ellos están bien nutridos, y segundo, porque creen que los alimentos sintéticos nos salvarán de la muerte por inanición. Pero no podemos olvidar que muchos están muriendo de hambre ahora mismo, y es ahora cuando necesitaríamos estos alimentos sintéticos. Además, la fabricación futura de alimentos artificiales requerirá inevitablemente más energía, otro problema fundamental causado por la explosión demográfica.

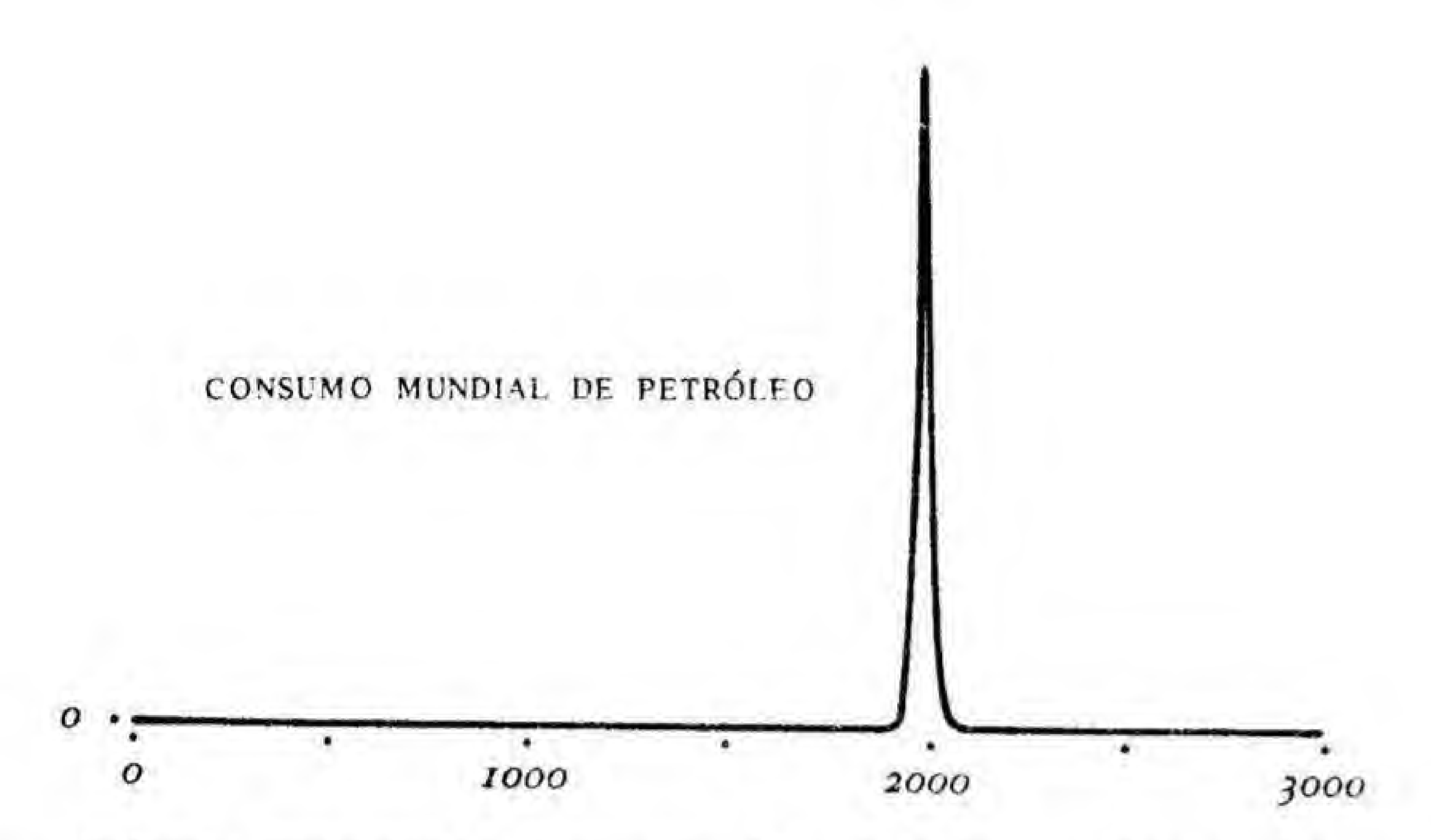
La energía es el denominador común de todas las sociedades tecnológicas. Se necesita energía para el funcionamiento de automóviles, trenes, aviones y otros sistemas de locomoción; para disfrutar de teléfonos, radios y televisores que nos permitan complementar los contactos personales; para fabricar ropa y viviendas que aumenten el mecanismo termostático de nuestro cuerpo y nos permitan residir en lugares terrestres (y algún día extraterrestres) normalmente inadecuados para los seres humanos; para practicar la medicina y la nutrición necesarias para una vida más larga y sana; para crear libros y computadoras que nos ayuden a recordar todo lo que sabemos. Toda la producción industrial, no sólo la síntesis de alimentos, sino también la extracción de recursos y la fabricación de artículos de consumo diario, requieren el empleo de energía. La mayor parte de actividades humanas depende actualmente de ella.

Cabría suponer que el mayor problema con el que nos enfrentamos ahora es la falta de energía suficiente para seguir funcionando. Pero ésta es sólo una preocupación superficial, expresada por las sociedades egoístas existentes en la actualidad, únicamente preocupadas por el peligro de no poder llenar mañana los depósitos de gasolina de sus automóviles. Cuando se examina en su totalidad el cuadro de la energía, reconocemos que el verdadero problema es precisamente lo contrario: nuestra civilización puede producir dentro de poco demasiada energía.

Aunque se ha agotado menos del diez por ciento de la capacidad petrolífera mundial estimada, el ritmo actual del consumo de petróleo asegura el total agotamiento de las reservas existentes en menos de cuarenta años. Así pues, dentro de menos de una generación nuestro planeta carecerá de petróleo, estará desprovisto de un recurso importante que es esencialmente irrenovable. En el curso de unos cien años, nuestra civilización habrá agotado por completo un combustible fósil que necesitó centenares de millones de años para almacenarse.

Ésta es una de las herencias que estamos destinados a legar a la posteridad. Cuando nos contemplen desde una perspectiva histórica, nuestros bisnietos y sus descendientes sabrán que fueron los seres humanos del siglo XX los que derrocharon todas las reservas petrolíferas con que la naturaleza dotó a nuestro planeta. En realidad, el consumo mundial de petróleo en el futuro puede imaginarse como una tenue llama en una noche larga y oscura.

¿Qué vamos a hacer? ¿Con qué combustible haremos funcionar nuestra civilización tecnológica? Hay quien propone la fisión nuclear, que es la técnica empleada actualmente en las centrales



nucleares para producir energía. Pero la fisión también produce desechos radiactivos altamente tóxicos para nuestro medio y quizá también para nuestros genes, aunque sea muy adecuada para el armamento termonuclear.

Otros proponen la fusión nuclear, el mismo proceso que genera energía en las estrellas y que deja muchos menos desechos radiactivos. Pero la fusión aún no está dominada, y es probable que tardemos muchas décadas en dominarla.

Algunos proponen el carbón, otro recurso irrenovable del planeta Tierra. Pero el empleo del carbón va acompañado de problemas de contaminación potencialmente graves; el carbón quemado volverá sin lugar a dudas en forma de lluvia ácida. Además, la mayor parte de reservas carboníferas se encuentran en el Medio Oeste americano, cuyo suelo debería ser socavado en su totalidad. Las reservas conocidas durarán unos pocos siglos, pero, ¿y después?

Incluso los que abogan por el recurso recién descubierto, la conservación, reconocen que su solución será un remedio temporal. No cabe duda de que la conservación de recursos irrenovables ofrece el mejor ataque contra la apurada situación en que se encontrarán todas las naciones durante el resto del siglo XX. Pero la conservación no resuelve a largo plazo la cuestión de la energía.

Por último, hay quien sugiere que todos estos planes energéticos basados en los recursos irrenovables son ridículos. Y de hecho, parece absurdo que una civilización inteligente saquee las fuentes de energía de su propio planeta cuando puede obtenerla en cantidades ilimitadas de su estrella madre, en nuestro caso,

el Sol. Aunque la energía solar es económicamente inviable en la actualidad, su desarrollo parece la inversión más sensata. Es preciso reconocerlo: si las plantas son capaces de absorber energía solar, también los animales inteligentes deberían saber hacerlo.

Pero dejando aparte la escasez de energía, hay pocas personas que se paren a pensar en la esencia del problema energético. El verdadero dilema no consiste en saber cuál de estas alternativas ha de elegir nuestra civilización en su progreso hacia el futuro, sino en reconocer el incesante incremento de nuestra producción energética, independientemente de cualquier recurso y cualquier técnica. Porque la energía es calor.

El calor es un subproducto inevitable de la extracción de energía de una sustancia (leña, carbón, petróleo, gas, viento) o de los átomos, o del Sol, o de *cualquier* otra fuente. Sea cual sea la base de la energía la Tierra está constantemente sometida al calor generado por nuestra civilización industrial. Ya nos hemos dado cuenta de que en el centro de las grandes ciudades hace más calor que en los suburbios y de que los reactores nucleares calientan las vías fluviales más próximas. Aunque sabemos que este calor es actualmente un elemento imperceptible en el medio ambiente, no deja de incrementarse, obedeciendo a una curva exponencial clásica como la de la población, por lo que está destinado a alcanzar un grado excesivo cuando ya sea demasiado tarde para evitarlo. Un calentamiento importante trastornará el delicado equilibrio existente entre la energía solar y la irradiada por la Tierra, destruyendo tal vez el natural equilibrio termal que mantiene la temperatura razonablemente agradable de nuestro planeta. Aunque pocos aprecian este hecho, estamos contaminando el aire con calor.

Diversas estimaciones del calentamiento planetario indican que si la temperatura media de la superficie terrestre aumentara en sólo dos grados centígrados se producirían graves consecuencias en el medio ambiente, la más seria de las cuales sería la fusión de los casquetes polares. La región ártica no es más que un inmenso iceberg, y su desintegración no elevaría el nivel mundial de las aguas, del mismo modo que la fusión de los cubitos de hielo que flotan en un vaso no afectan al nivel del líquido. Pero el desmoronamiento de la región antártica, una enorme masa de hielo que no está a flote, porque cubre extensas tierras, podría elevar el nivel del mar setenta metros, inundando las ciudades costeras que albergan a grandes sectores de la población mundial. No hablamos de inundar playas turísticas y terrenos pantanosos, sino importantes centros de población forjados a lo largo de los siglos como consecuencia del comercio marítimo y fluvial. ¿Cuántas grandes ciudades del mundo podemos nombrar que no estén construidas a la orilla del mar?

No sólo se elevarían las aguas del océano, sino que además aumentaría el vapor atmosférico. Esto se traduciría en una espesa capa de nubes que permitiría el paso hasta la superficie terrestre de las ondas de radio solares pero no el de gran parte de la radiación infrarroja de onda más corta emitida por la Tierra hacia el espacio; la radiación infrarroja (calor) producida industrialmente tampoco podría atravesar la capa de nubes. La radiación atrapada permanecería en la atmósfera, calentándola todavía más, y causando con ello más fusión, más inundaciones, más agua atmosférica y más nubes. Si la Tierra se calentara lo suficiente como para iniciar la fusión de los casquetes polares, sólo un milagro tecnológico podría evitar que una cadena de efectos ambientales espesara aún más la capa de nubes, imposibilitando la vida en el planeta por exceso de calor. Un proceso semejante se desarrolla en el interior de los invernaderos y de los automóviles en días calurosos; y el mismo proceso actúa a pleno rendimiento en el planeta Venus, cubierto de nubes, calentando su superficie a una temperatura suficiente para fundir el plomo.

¿Podrían realmente los excesos de la civilización tecnológica desencadenar tan terribles consecuencias? ¿Cuánta energía pueden generar todos nuestros productos tecnológicos —automóviles, cocinas, fábricas, lo que sea— sin que la temperatura de la superficie terretre se eleve hasta el punto de desencadenar este proceso irreversible? Conociendo la incidencia total de la radiación solar en el planeta Tierra, un sencillo cálculo revela que la temperatura media de la superficie terrestre se incrementaría en dos grados centígrados cuando la energía total emitida alcanzara unos pocos miles de billones de vatios. Puesto que la energía empleada ahora por todos los habitantes de la Tierra suma casi diez billones de vatios, una producción energética cien veces mayor, producida por cualquier técnica, incluso por métodos solares, provocaría la fundición de los casquetes polares. Esto sólo equivale a ocho períodos de duplicación. Dado que el actual consumo de energía aumenta exponencialmente al ritmo anual de varias unidades, un sencillo cálculo sugiere que dentro de tan sólo dos siglos la producción industrial alcanzará el grado en que la Tierra amenazará con convertirse en una gigantesca barbacoa.

Este calentamiento de la biosfera del planeta se acelerará con el empleo de grandes cantidades de carbón, aconsejado ahora por burócratas en su mayoría no científicos. Lo malo del carbón es que contamina el aire con anhídrido carbónico incoloro e inodoro que actúa como un espejo de una sola cara y atrapa todavía más calor en la atmósfera. Si el carbón llegara a ser nuestra principal fuente de energía cuando el petróleo se haya agotado,

el calentamiento global freiría a nuestros descendientes en menos de cien años.

Como si quemar carbón no fuera ya bastante malo, los seres humanos contaminamos directamente el aire con anhídrido carbónico. Cada vez que respiramos, exhalamos este gas, resultado de reacciones químicas que tienen lugar en nuestros cuerpos, por lo que un exceso de población contribuye también a calentar el ambiente. Las plantas sólo pueden absorber cierta cantidad de anhídrido carbónico, y con la masiva tala de árboles destinados a proveer de viviendas y papel a nuestra desmesurada población mundial, vastas cantidades de monte bajo están desapareciendo de nuestro paisaje. De hecho, una medición reciente del contenido en bióxido de carbono ha demostrado que está en alza. Es algo irrefutable.

Después de millones de años de estar supeditados a los caprichos del medio ambiente, los seres humanos aprovechamos ahora nuestros conocimientos para cambiarlo. Pero un calor excesivo no conviene a nadie.

Dos últimas observaciones: Algunos investigadores aducen que, por irónico que parezca, sería posible evitar el recalentamiento inducido por el hombre mediante una mayor degradación de la calidad del aire. En teoría, los desechos microscópicos son capaces de reflejar la luz del sol, enfriando así la biosfera. En la práctica, sin embargo, el grueso de los desechos, subproductos de la producción industrial, es hollín o humo. En lugar de reflejar la luz solar, el hollín sucio y oscuro absorbe gran cantidad de ella, calentando más la biosfera. Así pues, sería un error dedicarse a contaminar el aire bajo el pretexto de frenar el recalentamiento atmosférico.

Otros investigadores ofrecen argumentos más improbables, afirmando, por ejemplo, que el calor de la biosfera puede ser contrarrestado por el enfriamiento natural que se produce a medida que el planeta oscila hacia un nuevo período glacial. Pero este argumento no es válido, porque las escalas de tiempo no son ni aproximadamente comparables. El próximo período glacial no es esperado hasta dentro de muchos miles de años. En el curso de los próximos siglos, por no decir de los próximos milenios, la temperatura de la Tierra no disminuirá apreciablemente como resultado de causas naturales. El alineamiento astronómico que provoca el enfriamiento de los planetas está demasiado lejos en el futuro. No confiemos, pues, en que un período glacial nos resuelva este problema de contaminación termal.

En suma, sería engañarnos a nosotros mismos pensar que podemos generar ilimitadas cantidades de energía para atender a las necesidades diarias de una población que se multiplica rápidamente. Acelerar el crecimiento económico no es la solución de

nuestros problemas, sino más bien la creación de otros nuevos. Para evitar el nocivo calentamiento de nuestro medio ambiente hay que frenar el consumo de energía de nuestra civilización, y esto sólo puede lograrse frenando el crecimiento demográfico mundial.

Cambiar o perecer.

Aparte de los problemas causados por la superpoblación del planeta, graves problemas potenciales nos amenazan a causa de las acciones de unos cuantos individuos. Nos referimos a la autodestrucción deliberada, que podría eliminar a la vida inteligente de la faz de la Tierra.

La guerra moderna es un ejemplo muy apropiado de la autodestrucción. Las organizaciones militares están desarrollando constantemente nuevas formas de matar a seres humanos y destruir toda clase de cosas. En 1980, las Naciones Unidas anunciaron que el mundo gasta en armamento un millón de dólares americanos *por minuto*. Explosivos nucleares, armas guiadas por láser, bombas de neutrones, misiles móviles, sustancias químicas letales y un arsenal creciente de otras armas destructivas se han convertido en ingredientes permanentes de nuestra civilización. No se trata de armas corrientes, capaces de mutilar a individuos aislados, sino de municiones globales, capaces de despedazar a naciones enteras. Pensemos en las bombas nucleares.

Las existencias mundiales en armamento nuclear equivalen actualmente a unos veinte mil millones de toneladas de TNT, sustancia química altamente explosiva empleada en la producción de dinamita. Las cifras en miles de millones ya no aturden a los lectores de los primeros capítulos, pero la consideración de la densidad en armamento no puede dejar de escandalizar a nadie. Si dividimos este arsenal mundial por el número de habitantes del planeta, veremos con asombro que corresponden cinco toneladas de TNT *por persona*. No se trata de cinco balas ni de cinco cartuchos de dinamita, sino del equivalente nuclear de cinco toneladas de explosivos para cada hombre, mujer y niño de este planeta. ¡No es extraño que lo llamen capacidad destructiva máxima!

Si seguimos pensando en ello, comprenderemos el grado de nuestra locura, porque no sólo pagamos todas estas armas, sino que además las toleramos. Somos miembros de una sociedad que consiente la escalada impune de armas nucleares que sólo sirven para una cosa: la guerra nuclear. Y, contrariamente a la creencia general, las conversaciones sobre limitación de armas estratégicas no reducen este armamento. Este servicio de propaganda bilateral sólo sirve, si acaso, para regular la expansión de las potencias destructivas mundiales.

¿Qué clase de daño garantiza la bomba nuclear normal, la de un megatón de potencia? Cien veces más destructiva que la bomba de Hiroshima, la detonación del equivalente de un millón de toneladas de TNT crearía una brillante bola de fuego, cuyo centro alcanzaría temperaturas de millones de grados centígrados, comparables a las del interior del Sol. Tan repentino calentamiento causa la expansión del aire que rodea el lugar de la explosión, la cual a su vez origina una onda de choque cuya presión alcanza valores varios miles de veces superiores al de la presión atmosférica. Semejante presión extrema sería suficiente para desmoronar casas de ladrillo corrientes en unos cuatro kilómetros a la redonda. Esta bomba nuclear normal, de la que existen en la actualidad decenas de miles en los arsenales del mundo, sería absolutamente fatal para edificios, personas y casi todo lo demás en un área de cincuenta kilómetros cuadrados. No sólo la explosión sería destructiva, sino que el calor emitido por una explosión nuclear de un megatón es capaz de hacer arder el papel en un radio de quince kilómetros, lo cual asegura una serie de incendios por toda la región. Cualquiera que fuese la zona de la ciudad en que cayese la bomba, la destrucción de vidas y propiedades sería tan enorme que en el lanzamiento ni siquiera se necesitaría puntería.

Esta descripción no aspira a provocar histerismo; se trata simplemente de hechos. La construcción de bombas nucleares se basa en las leyes de la física, y las desastrosas consecuencias de su uso son dictadas igualmente por dichas leyes.

Es importante además reconocer que las bombas nucleares no son sólo versiones a mayor escala de las armas convencionales. Las partículas radiactivas producidas durante la explosión, así como las destinadas a atravesar la atmósfera y caer lejos del lugar del impacto, causarían un daño prácticamente irreparable, inutilizando la tierra durante cientos, quizá miles, de años. Como es natural, una guerra nuclear dejaría la faz del planeta drásticamente cambiada, tal vez sin habitantes. Es probable que quedaran destruidos todos los monumentos naturales y toda la obra del hombre.

En un mundo de tan enorme potencia destructiva, no puede haber una verdadera defensa. Tanto Estados Unidos como la Unión Soviética poseen terribles fuerzas destructivas, y cada bando sabe que el otro dispone de ellas. El resultado se califica de situación «estable» en la que ninguno de los dos países se atrevería a atacar; una estabilidad llamada por algunos equilibrio de poder y por otros, paz por el temor. El lenguaje del Pentágono

ha acuñado una frase: «destrucción mutuamente asegurada», cuyas siglas en inglés son *MAD*, es decir, «loco».

Es muy poco probable que los enfoques alternativos, como el de señalar sólo las instalaciones militares como blancos estratégicos, anunciado durante el año electoral americano de 1980, detengan la destrucción total en caso de guerra. Puede que incluso aumenten la posibilidad de un enfrentamiento armado.

En cualquier caso, la verdadera situación no es de estabilidad completa. De vez en cuando se producen incidentes que incrementan la posibilidad de guerra entre las superpotencias. La causa podría ser una crisis internacional, que involucrara tal vez a Estados Unidos y la Unión Soviética, o quizá implicara inicialmente a otros países y poco a poco se intensificara hasta el punto de provocar un conflicto armado entre las superpotencias. Podría surgir la inestabilidad en confrontaciones a corto plazo como la crisis cubana de los misiles a principios de la década de 1960 y la guerra de los Seis Días en Oriente Medio en 1967, o en hostilidades a largo plazo como la cuestión de Vietnam y las revoluciones en la región del Golfo Pérsico. Aunque las crisis internacionales inesperadas no significan una guerra inmediata, tampoco aumentan las probabilidades de paz.

También en el equilibrio del poder se producen regularmente inestabilidades a medida que se introducen o retiran importantes sistemas de armamento. Durante cierto tiempo, uno de los bandos tiene o cree tener una ligera ventaja sobre el otro. Los armamentos sofisticados pueden incluso dar a un bando una mayor capacidad de ataque, permitiéndole una ofensiva tan devastadora que el otro gobierno sería incapaz de reaccionar adecuadamente. Por ejemplo, la construcción y el despliegue de misiles de crucero «inteligentes», bombas nucleares de lanzamiento móvil o vehículos múltiples recuperables con blanco independiente pueden dar una ventaja decisiva a Estados Unidos, por lo menos hasta que la Unión Soviética consiga neutralizar estas nuevas armas con otras similares. Y a la inversa, la introducción de toda una nueva clase de misiles balísticos intercontinentales soviéticos de enorme potencia de lanzamiento, o el desarrollo de satélites asesinos como parte de su nuevo armamento inclinaría la balanza a su favor, por lo menos hasta que el gobierno norteamericano inventara nuevas armas que pudieran restablecer el equilibrio de poder. Incluso la reciente iniciativa soviética de construir refugios subterráneos de grandes dimensiones para proteger de una conflagración nuclear a elementos clave de sus centros civiles e industriales sirve para desnivelar la balanza. Un programa nacional soviético de defensa civil podría ser considerado una ventaja soviética o al menos una inestabilidad, porque Estados Unidos ya no podría tener como rehén a la población soviética, como los soviéticos tienen ahora a la población norteamericana en ausencia de un importante programa estadounidense de defensa civil.

Hay numerosos ejemplos de crisis internacionales y carrera de armamentos, todos los cuales sirven para aumentar las probabilidades de guerra, simplemente porque la balanza de las superpotencias sufre un ligero desnivel. Este tema se cuenta entre los que están sobre el tapete en las conversaciones sobre limitación de armas estratégicas de Ginebra y en las sesiones de Naciones Unidas en la ciudad de Nueva York. Pese a ello, la carrera armamentística continúa casi al mismo ritmo e inquietantes confrontaciones internacionales surgen repetidamente por todo el globo.

¿Qué efecto tendrá una reiterada serie de inestabilidades sobre el futuro de nuestra civilización? La perspectiva parece ser un inevitable holocausto nuclear en el Hemisferio Norte. Para comprenderlo, consideremos el siguiente análisis.

Supongamos que hay como término medio una inestabilidad cada media docena de años; tal es aproximadamente el ritmo de las principales oscilaciones en el equilibrio del poder desde la Segunda Guerra Mundial. Supongamos también que existe un noventa y cinco por ciento de probabilidades de paz durante cualquier período de inestabilidad, lo cual equivale a una posibilidad entre veinte, o al cinco por ciento de probabilidades, de que estalle una guerra. Después averigüemos el grado de incremento de esta posibilidad de guerra a medida que la civilización pasa por los diversos períodos de inestabilidad. En otras palabras, ¿cuántos períodos de inestabilidad puede soportar una civilización tecnológica antes de que la probabilidad total de guerra exceda la probabilidad total de paz? La respuesta es alrededor de diecisiete inestabilidades, o sea cien años.

La autodestrucción por medio de la guerra moderna es siempre posible, claro está, incluso aunque las superpotencias estén equilibradas. Nadie conoce la exacta posibilidad de guerra en tiempos estables, aunque es fácil imaginar que debe ser muy pequeña. Los cálculos como el expuesto más arriba indican simplemente que la probabilidad de guerra no sólo aumenta un poco durante cualquier período de inestabilidad, sino que también crece constantemente con el tiempo, ya que las fisuras del equilibrio de poder no son del todo independientes. Si, de acuerdo con el cálculo expuesto, las inestabilidades globales aumentan la probabilidad de guerra en un cinco por ciento en cualquier período de tiempo, entonces la probabilidad conjunta de un holocausto nuclear se elevará por encima de la probabilidad de paz —en un cincuenta y uno por ciento— al cabo de sólo diez dé-

cadas. Si este examen esterilizado de la guerra y la paz se aproximara de algún modo a la verdad, nos encontraríamos más o menos a un tercio del camino hacia la guerra final.

Si la probabilidad media de guerra durante los períodos de inestabilidad fuese mayor, entonces este tipo de análisis sugiere que la guerra nuclear podría ser inminente. Por el contrario, una menor probabilidad de guerra durante inestabilidades individuales indica que las superpotencias podrían ser capaces de evitar la guerra durante un tiempo más prolongado. Sólo si la probabilidad de guerra en estas circunstancias es mucho menor de un uno por ciento, podemos esperar el aplazamiento de una catástrofe nuclear por unos cuantos siglos, que es un tiempo muy corto a escala cósmica. Pero por pequeña que sea la probabilidad de guerra, ésta excederá a la de la paz, haciendo más que probable la guerra nuclear.

Los análisis como éste giran en torno a la probabilidad media de guerra durante un período de inestabilidad y, como es natural, nadie conoce con seguridad este valor; hay demasiados factores implicados, incluyendo a la naturaleza de la humanidad, que sin duda influiría de alguna manera compleja la reacción de los gobiernos a favor o en contra de la autodestrucción nuclear. Numerosos factores sociopolíticos parecen desempeñar asimismo un papel integral, pero ninguno de ellos puede ser cuantificado y, en cualquier caso, en una sociedad tecnológica en rápido progreso estos factores pueden llegar a ser casi irrelevantes. Además, la naturaleza de la humanidad podría no intervenir para nada en tiempos de crisis, por lo que entonces el argumento giraría únicamente sobre la base de la teoría de la probabilidad, y sería el siguiente:

Aunque la probabilidad de guerra sea pequeña durante un único período de inestabilidad, una civilización sólo podrá soportar inestabilidades hasta que la probabilidad conjunta de guerra empiece a exceder a la de la paz.

Naturalmente, este tipo de análisis siempre tiene sus detractores, que no son necesariamente la clase de personas que lo ven todo de color de rosa. Sostienen, por ejemplo, que nuestros mandatarios no reaccionarían con represalias aun sabiendo que el arsenal nuclear de otro gobierno se les echaría encima dentro de los veinte minutos que los misiles balísticos intercontinentales necesitan para viajar de un punto a otro del globo. Pero, ¿cómo podemos confiar en que un jefe de gobierno sacrifique a su pueblo por el bien de la civilización? Ejercer represalias está tan mecanizado que el elemento de humanidad queda reducido al mínimo, si es que no se pierde. Si ciertos elementos del Departamento de «Defensa» norteamericano se salieran con la suya, la reacción americana correría a cargo de sistemas de computadoras-radar, no del Presidente. Este ciudadano elegido por el pueblo podría invalidar a la computadora vetando la orden, pero en el caso de que vacilara, sus misiles ya se habrían disparado automáticamente. Vivimos en un tiempo en que las decisiones y el control han sido confiados a las máquinas y, para bien o para mal, las palabras como «humanitario», «civilizado» y «supervivencia» no están computadas.

Otros sostienen que las armas nucleares no se emplearán nunca. Las represalias no hacen al caso porque nadie será lo bastante insensato como para desencadenar una guerra nuclear. Pero, ¿podemos permitirnos el lujo de creer este punto de vista? No es nada más que esto... una creencia. Las naciones beligerantes no han dejado nunca de utilizar las armas más potentes que tenían a su disposición. Desde los albores de la historia, el armamento y la perspectiva de una guerra han ido siempre juntos; el desarrollo de las armas ha precipitado siempre su empleo en la guerra. Con pocas excepciones, cada arma nueva, más letal que las anteriores, desde la ballesta a los cañones, la dinamita, los tanques y las bombas atómicas, se ha utilizado eventualmente en el campo de batalla. Es un hecho histórico que en cuanto los seres humanos han inventado un arma nueva, no pueden esperar para usarla. Quienes dicen que las armas nucleares son diferentes merecen una fría réplica: ¿Cómo podemos estar tan seguros de que la bondad, la racionalidad del ser humano surgirá en el momento oportuno?

Hay quien dice que un holocausto nuclear a gran escala no aniquilará necesariamente a todos los habitantes del planeta. Esto casi equivale a decir que la guerra nuclear puede ganarse. Pero el mismo concepto de la destrucción asegurada hace que esto sea imposible. Con semejante capacidad destructiva almacenada en nuestros depósitos nucleares, es casi seguro que los supervivientes de las explosiones sucumbirían bajo la precipitación radiactiva, el caos económico, la ausencia de ozono y el enfriamiento climático. Los efectos acumulativos de una guerra nuclear generalizada serían tan catastróficos que cualquier idea de una «victoria» carecería de sentido. Semejantes argumentos son totalmente engañosos, ofrecidos por personas irresponsables, del tipo que, por desgracia, ha dirigido el desarrollo de la política de armamento nuclear. Esperemos una vez más que argumentos de esta clase no sean verdaderos reflejos de la naturaleza real de la humanidad.

El concepto actual de la destrucción mutuamente asegurada debe ser enmarcado en términos más realistas a fin de que refleje toda la magnitud del cataclismo que representaría una guerra nuclear. Después podremos hacer planes, no para limitar las armas nucleares, sino para prohibirlas rigurosamente. Cambiemos

de filosofía: en vez de aspirar a una destrucción mutuamente asegurada, procuremos alcanzar el objetivo más elevado de la supervivencia mutuamente asegurada.

Los problemas presentados aquí son, claro está, mucho más complejos, debido en gran parte a que varios de ellos están interrelacionados. Por ejemplo, si las actitudes sociopolíticas actuales no sufrieran ningún cambio, la posibilidad de que alguien emplee bombas nucleares —el problema de la autodestrucción— aumentaría a medida que creciera el número de habitantes, que es el problema demográfico.

Los conflictos actuales están destinados a empeorar a medida que los pueblos, tal vez naciones enteras, se desesperen por falta de alimentos y energía. Las guerras cuyo único fin es distribuir mejor la riqueza pueden ser la única forma de que las naciones pobres, que no creen tener nada que perder, hallen un remedio para su deteriorada situación económica. La perspectiva de que los países en vías de desarrollo puedan inducir catalíticamente la guerra nuclear entre las superpotencias crece sin interrupción. Incluso el espectro de terroristas enmascarados haciendo chantaje nuclear con plutonio clandestino está empezando a cobrar realidad. Los escépticos deberían tener en cuenta que importantes cantidades de plutonio y uranio enriquecido, producidos en centrales nucleares norteamericanas, desaparecieron hace un tiempo. Además, por lo menos una gran ciudad norteamericana ha considerado ya seriamente la posibilidad de capitular ante una exigencia de muchos millones de dólares bajo la amenaza de destrucción de la ciudad por una bomba de hidrógeno, una broma que ni la Comisión de Energía Atómica ni el FBI han podido desautorizar.

Es evidente que el crecimiento continuado de la población mundial y la incesante amenaza de un holocausto nuclear son los principales problemas con los que se enfrenta actualmente nuestra civilización.

Cambiar o ser aniquilados.

Supongamos que podemos resolver todos los problemas mencionados, reconociendo que la gravedad de cada uno puede reducirse mediante la información compartida, la inteligencia, la previsión y el cambio.

Incluso así, existirán otras dificultades. En cuanto la civilización haya superado la adolescencia tecnológica, encontrará en su camino hacia el futuro toda clase de peligros. Aunque menos seguras que las mencionadas con anterioridad, estas crisis tendrán un efecto debilitador sobre el bienestar de la civilización terrestre. Consideremos un par de dificultades posibles, un empeoramiento de la calidad de los genes, y una mejoría de la calidad de las computadoras; ambas cosas pueden sobrevenir a nuestros descendientes antes de lo que nos gustaría admitir.

La degeneración genética es un buen ejemplo de problema futurista que las civilizaciones tienen que soslayar, suprimir o resolver como sea a fin de sobrevivir. Se trata de un dilema fundamental que, como el de la explosión demográfica, proviene del descubrimiento de las bacterias. Como el problema de la población que se multiplica rápidamente en cuanto alcanza la porción explosiva de la curva exponencial, la degeneración genética puede infiltrarse sutilmente en comunidades de seres tecnológicamente inteligentes antes de hacer su violenta aparición. No será fácil de reconocer hasta que nuestros descendientes se encuentren ante el problema y tengan que resolverlo a la desesperada. Futurista o no, las raíces de esta crisis parecen ya afianzarse en nuestra sociedad.

Recordemos por un momento el dogma central del neodarwinismo: las alteraciones accidentales de la estructura del ADN permiten que los organismos reaccionen a un medio gradualmente cambiante. A algunos, la adaptación les permite sobrevivir y apoderarse de nichos nuevos; para otros, la adaptación no sirve de nada y les conduce a un terminal evolutivo o incluso a la extinción. En resumen, las mutaciones genéticas seguidas de la selección natural promueven la supervivencia de los más fuertes. Se trata de una regla para todos los seres vivos. Sin embargo, con el paso del tiempo suficiente, incluso las reglas de la naturaleza cambian.

En cuanto una especie adquiere inteligencia tecnológica —por lo menos la competencia para inventar la medicina—, la tasa de mortalidad infantil disminuye, la duración de la vida aumenta, y no sólo sobreviven los más fuertes, sino también todos los demás. Aunque la medicina cura actualmente las enfermedades contagiosas, parece que a la larga fomenta las enfermedades hereditarias. Expresado de otra manera, la medicina actual mejora nuestra salud, pero podría conducir a una sociedad genéticamente contaminada para los hijos de los hijos de los hijos de los hijos de nuestros hijos.

Los genes están cambiando. Seres humanos mental y físicamente retrasados, antes incapaces de sobrevivir para reproducirse, tienen ahora hijos fértiles. Es evidente que contribuirán con características favorables y desfavorables, pero el resultado es que la distribución de genes activos entre la especie humana está cambiando rápidamente. No hay mutaciones involucradas en este cambio; el único culpable es la medicina.

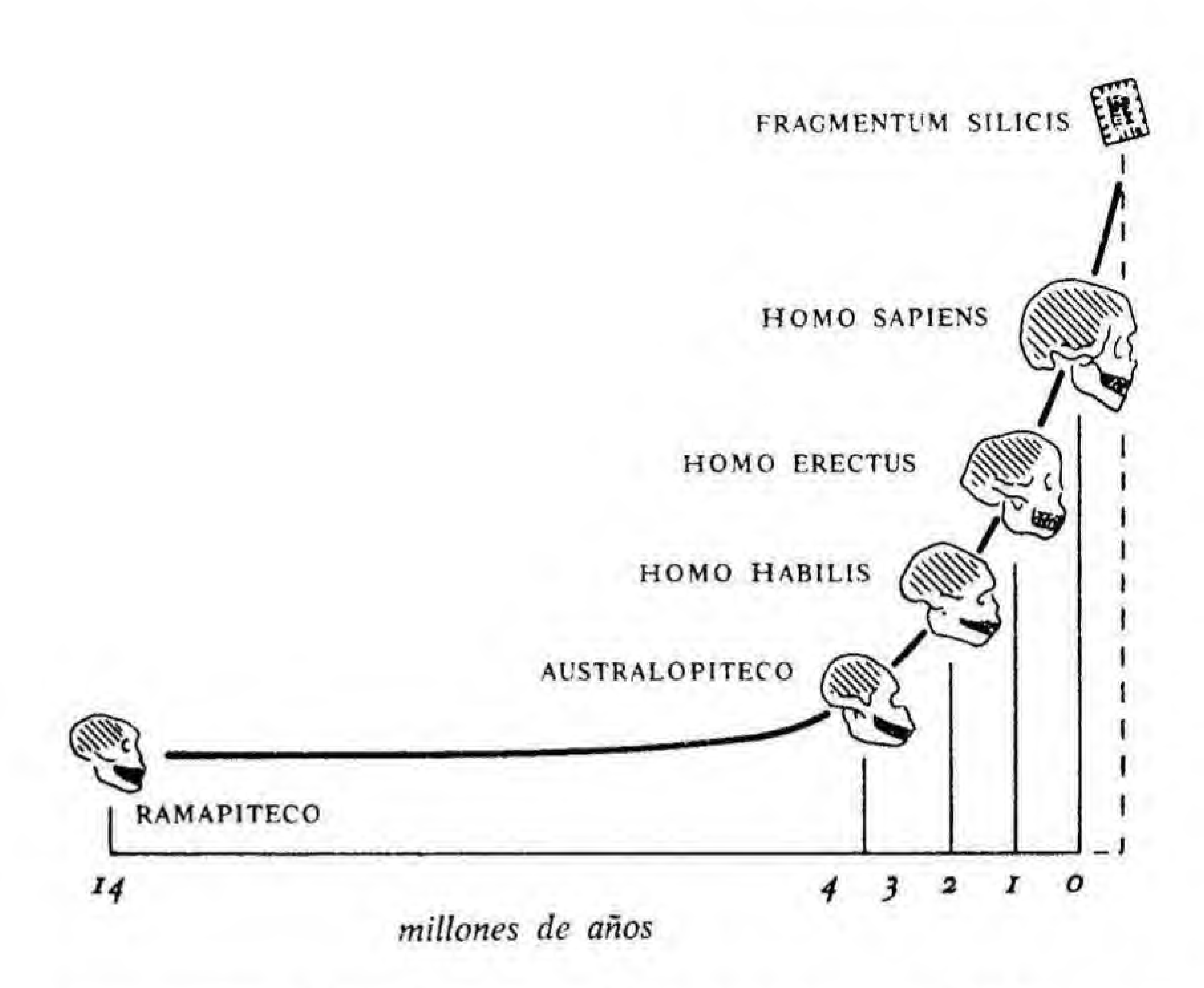
¿Puede el curso normal de la evolución biológica mantener el ritmo de este rápido cambio genético inducido por la invención de la medicina? La respuesta podría ser afirmativa si la evolución biológica continuara siendo lo que ha sido durante los últimos miles de millones de años. Pero la evolución biológica clásica de hombres y mujeres empieza a interrumpirse. ¿Por qué? Porque ya está en marcha un cambio incluso más fundamental.

Después de más de diez mil millones de años de evolución natural, la especie dominante del planeta Tierra está empezando a manipular la propia evolución. Mientras antes el gene (ADN) y el medio ambiente (estelar, planetario, geológico, sociológico) gobernaban la evolución, ahora hemos conseguido de repente el control tanto del medio ambiente como del gene. Estamos manipulando la materia, reduciendo los recursos de nuestro planeta y contaminándolo sin cesar. Y nos encontramos a punto de manipular la vida, alterando potencialmente la composición genética de los seres humanos.

Algunos especialistas, al parecer sordos a las generalidades a largo plazo, arguyen que la degeneración genética no se convertirá nunca en una crisis global que amenace a la supervivencia de la civilización. Basan sus afirmaciones en el supuesto de que nuestros descendientes no vacilarán en modificar, por medio de la microcirugía, la estructura del ADN de ciertos tipos de individuos. En otras palabras, la actual tendencia de los genes hacia el lado «malo» puede en principio ser controlada por alteraciones premeditadas de las propias moléculas genéticas.

Hace ya algún tiempo que los escritores de ciencia ficción dieron un nombre a esta clase de técnicas: manipulación genética. En la actualidad esta cuestión está pasando de la ficción a la realidad. Una vez esté en marcha la transición, todo el impacto del dilema, junto con sus tremendas implicaciones éticas, irrumpirá violentamente en nuestro mundo. ¿Quién controla la reproducción? ¿Qué especies, razas, individuos, deberían producirse? ¿Qué podría impedir la clonización de ejércitos enteros de profesionales embrutecidos, por muy remota que sea esta posibilidad? ¿Cómo podría afectar la ingeniería genética a las decisiones necesarias para evitar la autodestrucción nuclear y de otros tipos? Incluso aunque pudiéramos eliminar ciertas características del temperamento humano — la agresión, tal vez —, *¿deberíamos* hacerlo? Sin agresión y su impulso competitivo, ¿qué le ocurriría a nuestro instinto de exploración, a nuestra curiosidad?

La creciente complejidad de la maquinaria «inteligente» — ejemplificada por la computadora — es otro peligro potencial



que nuestros descendientes tendrán que afrontar. ¿Podría ser la inteligencia artificial el siguiente estadio en el progreso de la evolución cósmica? ¿Es sólo una cuestión de tiempo antes de que las computadoras basadas en el silicio superen e incluso reemplacen a los seres humanos basados en el carbono? ¿Están contados nuestros días de dominio intelectual?

Los científicos intentan actualmente programar a las computadoras para que piensen, aprendan e incluso creen. Todavía no se conoce el grado de inteligencia artificial al que se podría llegar. Aunque algunos investigadores sostienen que las computadoras de la actualidad no son más que máquinas al servicio de los deseos humanos, todo el mundo está de acuerdo en que tales máquinas ya realizan complejos cálculos matemáticos mucho más deprisa que los seres humanos. La rapidez es realmente su fuerte. Además, las memorias de las computadoras se han ampliado, lo cual les permite almacenar vastas cantidades de información.

Los programas escritos por seres humanos, insertados en las computadoras más avanzadas de la actualidad y perfeccionados aún más por la memoria de la máquina, han permitido a estas computadoras vencer a cualquier ser humano al juego de las

damas, y casi a todos al ajedrez. Después de cometer un error, la computadora almacena dicho error en su memoria y jamás lo repetirá; las computadoras sin vida saben aprender de la experiencia tal vez con más efectividad que los seres humanos. Cuando el límite de tiempo para las jugadas se abrevia lo suficiente, las computadoras derrotan con facilidad y de una manera aplastante incluso a un gran maestro del ajedrez. Además, robots capaces de asumir decisiones limitadas sin la guía constante de la Tierra se están construyendo ya para explorar las superficies de otros planetas de nuestro Sistema Solar.

Se debate acaloradamente la posibilidad de que puedan construirse algún día máquinas capaces de pensar o comprender por sí solas. Si es posible que aprendan, ¿por qué no enseñarles creatividad? ¿Llegarán algún día las computadoras no sólo a contestar preguntas clave, sino también a formularlas? Agunos investigadores niegan que puedan ser construidos semejantes ingenios porque existen diferencias fundamentales entre los seres humanos y las máquinas que no podrán ser vencidas por ninguna tecnología. Estos críticos afirman que es incorrecto sugerir siquiera que las computadoras funcionan como el cerebro humano. Las cualidades humanas de voluntad, intuición, emoción y conciencia, para no mencionar la requerida importancia de una «mente» separable del cerebro, nos indican que las computadoras actuales son, en comparación, retrasados mentales increíblemente rápidos. Otros discrepan, considerando inevitables a las computadoras pensantes, dado el ritmo del progreso tecnológico. Creen que los seres humanos son en esencia máquinas que en el futuro construirán máquinas más perfeccionadas para reemplazarse a sí mismos.

En cualquier caso, si las máquinas inteligentes llegaran algún día a incomodarnos de verdad, siempre estaríamos a tiempo de «desenchufarlas». Aun así, será importante observar el efecto en los valores humanos, la ética humana y el propio respeto en un mundo donde muchos *piensan* que las computadoras podrían dominarnos algún día.

Nuestro futuro, el futuro del planeta, es incierto, amenazado como está por numerosos dilemas que podrían significar la destrucción de la civilización terrestre y tal vez de la propia vida. ¿Puede nuestra precaria situación subsistir indefinidamente? ¿Cuál es la longevidad de una civilización tecnológicamente competente?

Debemos subrayar que los problemas que amenazan a la generación actual no son similares, ni siquiera en principio, a los de la generación anterior. La reciente expansión exponencial de

los avances tecnológicos y la incapacidad de la sociedad para asimilarla nos ha conducido a problemas *globales* básicamente distintos de los padecidos por los pueblos del pasado. En ningún otro período de la historia ha poseído el ser humano los medios para afectar a la situación de grandes sectores de la vida en nuestro planeta. En cierto modo, no es inconcebible que la vida de todo el planeta fuera eliminada en un futuro próximo.

Examinado desde lejos, todo el problema parece un poco paradójico. La evolución de la materia ha hecho posible nuestra galaxia, el Sol, el planeta y la vida. Y la evolución de la vida ha hecho posible nuestra inteligencia, cultura y tecnología. Pero ahora este mismo fenómeno — el cambio — parece amenazarnos. El cambio ha causado muchos de nuestros problemas actuales, y no obstante, para resolverlos necesitamos más cambio. La causa de todo es que la humanidad se ha sentado al volante, y ahora puede provocar el cambio con mucha más rapidez que la propia naturaleza.

En el siglo pasado incrementamos en más de un millón de veces nuestra velocidad de comunicación, en cien veces nuestra velocidad de locomoción, y en mil veces nuestro consumo energético. Sólo durante las dos últimas décadas hemos incrementado en varios millones de veces la velocidad del proceso de datos y la eficiencia del desarrollo armamentístico.

Algunas personas, incapaces de adaptarse a tan rápido cambio, arguyen que la tecnología es la causa principal de muchos problemas actuales. El crecimiento exponencial de la población, la contaminación ambiental, el agotamiento de los recursos naturales, la escasez de alimentos y energía, el peligro de una conflagración nuclear, la posibilidad de la degeneración genética y una larga lista de otros males está a punto de amenazar la viabilidad de la civilización terrestre y muy probablemente la de la vida misma. Y algunos de estos males son en efecto consecuencias de la tecnología. Sin embargo, el problema más triste de todos es que nuestras organizaciones sociales y políticas no están preparadas para poner en práctica las acciones previsoras indispensables para la continuación de nuestra existencia.

Para bien o para mal, podemos estar seguros de que nuestra civilización está aproximándose rápidamente a límites naturales finitos. Se ha producido un cambio fundamental en el modo de cambiar las cosas... por lo menos en la Tierra. Esto no significa necesariamente el fin de la civilización, pero no cabe duda de que el cambio repentino que hemos provocado nos está conduciendo a alguna clase de final. No podemos comunicarnos a mayor velocidad que la de la luz, que ya ha sido alcanzada por radios y televisiones. No podemos viajar alrededor de la Tierra a mayor velocidad que la orbital, alcanzada ya por las sondas es-

paciales y los astronautas. No podemos resolver el problema demográfico emigrando al espacio. No podemos consumir energía hasta el punto de contaminar termalmente el aire y fundir los casquetes polares. En cuanto a las armas nucleares, no podemos morir dos veces.

Nuestra civilización se encuentra en una etapa de transición cuyo alcance y condiciones no son conocidos por ninguna sociedad terrestre. ¿Qué podemos hacer? Sólo hay unas pocas opciones.

Primera, nuestra sociedad puede ser incapaz de resolver cualquiera de los problemas globales con que pronto nos enfrentaremos, en cuyo caso, y para todos los efectos, la civilización está perdida. Tal es el punto de vista de los agoreros. De entre los restos de esta civilización muerta podría tal vez surgir una nueva. Tal vez sí y tal vez no. En cualquier caso, esta «solución» reconoce que las civilizaciones avanzadas no pueden sobrevivir por mucho tiempo después de haber cruzado el umbral de la tecnología.

Segunda, la civilización puede resolver con éxito cada uno de los problemas de la Tierra a medida que alcancen un punto crítico. Al igual que una persona que cruza un campo de minas, podemos avanzar paso a paso, empleando la tecnología para aligerar nuestras dificultades, progresar y así, sobrevivir. Tal es el criterio de los optimistas tecnológicos. Esta solución parece razonable a primera vista, pero una reflexión más profunda sugiere un dilema fundamental.

Para evitar cualquiera de los inminentes peligros mundiales, la civilización tiene que estar dispuesta a sacrificarse. Soslayar, suprimir o al menos aliviar algún problema, requiere cierto renunciamiento por parte de nuestra civilización. Si nuestros descendientes eligen esta segunda alternativa, nuestra especie está destinada a ser menos libre para hacer lo que quiera y a estar más obligada a hacer exactamente lo necesario para garantizar la supervivencia. Esta segunda ruta nos conduce directamente a estados ordenancistas difíciles de definir pero en el que la libertad individual, la dignidad, la curiosidad y muchas otras cualidades inestimables de la naturaleza humana sufrirán una disminución o serán quizá eliminadas. La estabilidad completa parece implicar un estado de estancamiento en el que los derechos humanos no sólo estén ausentes sino que tal vez ni siquiera sean comprendidos.

Cabría preguntarse ahora: cuando muere la curiosidad, ¿muere también la inteligencia?

Afrontémoslo, el desarrollo continuado de nuestra civilización —y con él cualquier tentativa ulterior de prolongar la longevidad tecnológica— requerirá un delicado equilibrio entre dos peligros opuestos, cada uno de ellos inaceptable. Por un lado, dejar sin solución uno solo de los problemas globales significa enfrentarnos con el riesgo de una catástrofe. Y por el otro lado, nos encontramos frente a la tentación de convertirnos en una sociedad estancada como resultado del incremento del autoritarismo y del reglamentarismo necesarios para asegurar la supervivencia. Después de miles de millones de años de evolución, la vida terrestre ha llegado finalmente al mayor dilema posible para cualquier civilización tecnológica. ¿Contribuirá nuestra generación —o el género humano en última instancia— a la supervivencia de la especie? ¿Estamos dispuestos a enfrentarnos con la cuestión de la supervivencia de la raza humana en un mundo amenazado por la exterminación física y por diversas formas de deshumanización? ¿Existe un camino entre el peligro de catástrofe y la tentación del estancamiento?

Algunos científicos sugieren ahora que hay un medio de evitar el estancamiento y sobrevivir. El vehículo necesario para guiarnos por este camino intermedio puede ser un programa doble consistente en adaptar y colonizar los planetas cercanos y buscar al mismo tiempo civilizaciones galácticas. Semejante proyecto puede parecer prematuro —y, literalmente, lo es—, pero una reflexión serena indica que la superación consciente de nuestras facultades tiene más sentido que las blandas y complacientes actitudes que predican la concienciación social y el resurgimiento del fervor religioso. La meditación, unida al intento de frenar el cambio, no puede conservar indefinidamente a nuestra especie en este pequeño planeta; por el contrario, ampliar nuestros horizontes y aceptar el cambio parece un medio mucho mejor de alcanzar nuestra mayoría de edad como inteligencia en el Universo.

Los seres humanos pueden y deben empezar a ocupar y colonizar otros planetas y sus satélites. Esto no equivale a abandonar el barco ni es la ilusión infundada de encontrar en las estrellas soluciones para los problemas terrestres. (De hecho, los actuales peligros de superpoblación y guerra nuclear deben conjurarse cambiando el clima social de la Tierra, y sin pérdida de tiempo.) Se trata por el contrario de un programa racional que trasciende en su mayor parte nuestros problemas actuales e identifica un objetivo común que desvanecerá los complejos militares e industriales de ambos bandos, preocupados por el mal uso de enormes cantidades de recursos humanos. Y aún más importante, un programa de emigración parcial de nuestro planeta nos permitiría dispersar a la civilización terrestre por mayores espacios de tierra interplanetaria.

Recordemos que más arriba hemos criticado la colonización espacial, pero es que la colonización *planetaria* es una proposición muy diferente. La adaptación, el proceso de transformar planetas o satélites en objetos similares a la Tierra, puede sonar ridículo al principio, pero es probablemente más barato, más seguro y más realista que construir monstruosas cajas interplanetarias como hábitat para el hombre. Los planetas o sus satélites ofrecen sólidos cimientos, y algunos de ellos, Marte y Venus, por ejemplo, tienen la masa suficiente para retener a sus propias atmósferas, lo cual permitiría a los seres humanos vivir de forma natural en la superficie.

Es cierto que se requerirían considerables cambios ambientales para transformar las atmósferas compuestas predominantemente de anhídrido carbónico de estos planetas en oxígeno respirable. Pero existen conocidos procesos naturales que nos ayudarían. La plantación, por ejemplo, de ingentes cantidades de algas azules podrían convertir sus asfixiantes atmósferas en ambientes ricos en oxígeno por medio de la fotosíntesis.

El objetivo primordial de la colonización planetaria es la dispersión de la especie humana. Cualquiera de los problemas globales ya discutidos es un verdadero peligro para las sociedades confinadas en un solo planeta. En cambio, si la sociedad se dispersa hacia distancias astronómicas, es mucho menos vulnerable a una catástrofe local. La invulnerabilidad es la clave de la supervivencia de una civilización tecnológica. Las colonias individuales podrían fracasar en su intento de sobrevivir, en especial si tuvieran que afrontar muchos de los males que ahora o pronto sobrevendrán a los seres humanos de los siglos XX y XXI. Pero no todas perecerían e incluso aunque sólo una colonia planetaria lograse sobrevivir a los embates de catástrofes terrestres y extraterrestres, sería suficiente para preservar a nuestra civilización y nuestra especie.

Ahora es el momento de iniciar un esfuerzo decidido, preferiblemente internacional, para poner los cimientos de la colonización planetaria. Cuanto antes empecemos a explotar los recursos naturales de nuestro Sistema Solar, convirtiendo una parte de su materia en espacio vital biológico, y en especial dispersando a nuestra especie por una dilatada región espacial, tanto mejores serán las posibilidades de que el gran experimento de la Tierra —la vida inteligente— no acabe en un lamentable fracaso.

El segundo programa que los seres humanos deberían emprender simultáneamente con el primero es la búsqueda de civilizaciones galácticas. ¿Existen posibilidades de éxito? Pues

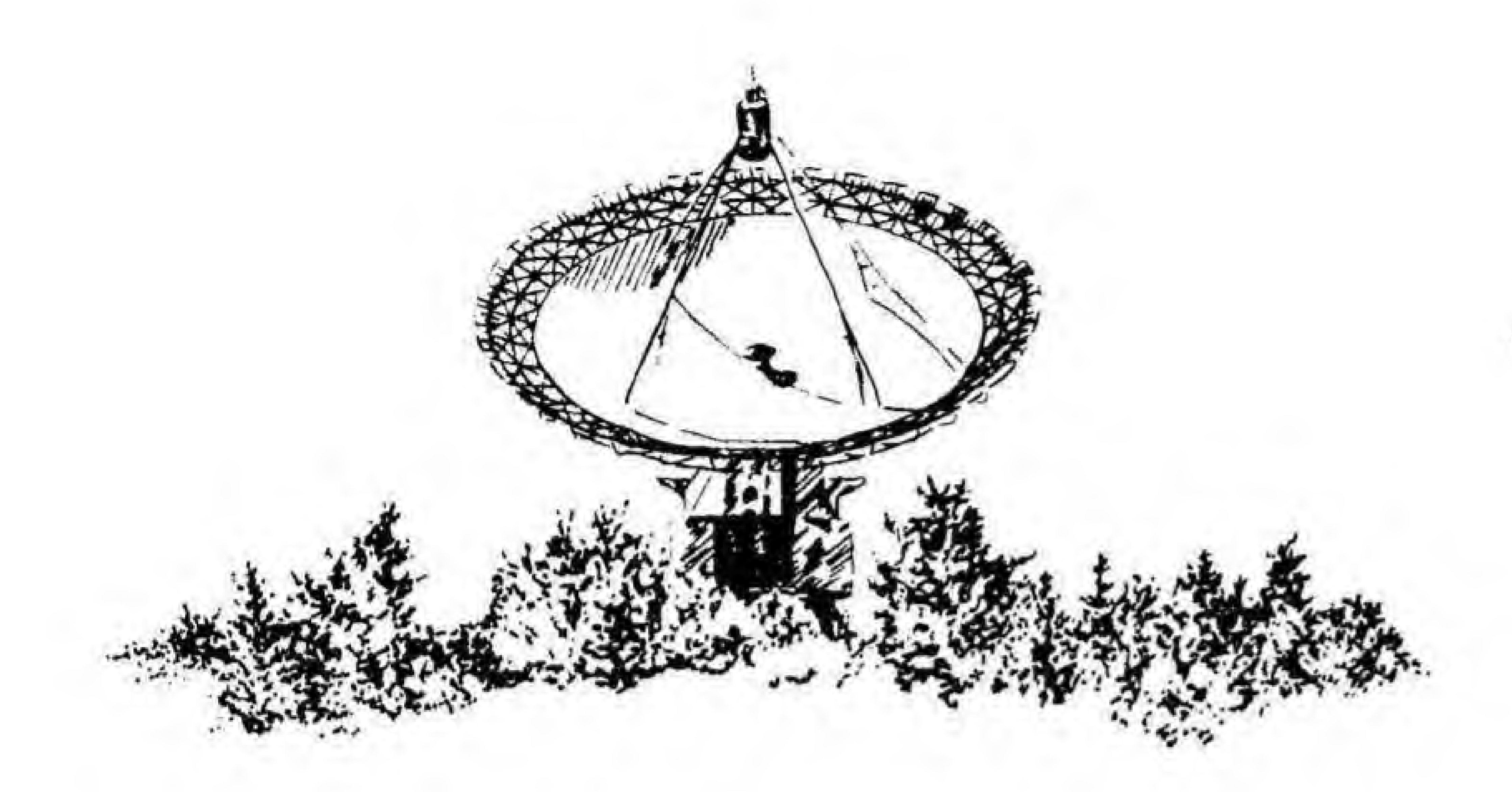
bien, recordemos nuestra conclusión de que no habitamos ningún lugar especial en el Universo. Todas las pruebas experimentales realizadas desde los tiempos del Renacimiento indican que vivimos en un pedazo de roca corriente, y giramos en torno a una estrella corriente en algún lugar de los suburbios de la Vía Láctea. Si somos ejemplos de algo en el Cosmos, es probablemente de una magnífica mediocridad.

Salvo una excepción, no hay nada único en el planeta Tierra. La excepción es que la Tierra es el único lugar del Universo donde sabemos categóricamente que existe la vida. Tal vez preferiríamos pensar que la evolución cósmica funciona por doquier en el Universo, pero la verdad es que no conocemos ningún otro punto del Universo en que haya aparecido la vida. Esto no significa que la vida no exista fuera de nuestro planeta; significa que si la vida extraterrestre existe, nosotros no poseemos los medios suficientes para saberlo.

El caso a favor de la existencia de vida extraterrestre puede resumirse profundizando en el significado de lo que solemos llamar nuestra mediocridad. Podemos proponer en particular el siguiente argumento: puesto que la vida de la Tierra depende de sólo unas cuantas moléculas básicas (en realidad, de moléculas compuestas de átomos comunes a todas las estrellas) y si las leyes de la evolución cósmica tal como las conocemos se pueden aplicar a todos los rincones del Universo, la vida puede surgir en numerosos lugares de nuestra Galaxia y de otras galaxias remotas. En otras palabras, dada la vastedad del Universo y las astronómicas escalas de tiempo imperantes en él, no parece razonable que la vida sólo se haya originado en el planeta Tierra. Incluso aunque los planetas dotados de ambientes favorables para la vida sean tan raros como uno solo por cada mil millones de sistemas estelares, habría por lo menos varios centenares de ellos solamente en nuestra Galaxia.

El punto de vista contrario sostiene que la vida inteligente de la Tierra es producto de accidentes inconcebiblemente afortunados, errores astrofísicos y bioquímicos cuya repetición es muy improbable en cualquier otro lugar de la Galaxia o del Universo. No se pone en tela de juicio a la evolución cósmica; de hecho, este punto de vista la considera correcta. La vida sigue considerándose una consecuencia natural de la evolución de la materia; pero no es, rotundamente, una consecuencia inevitable. Por lo tanto, los pasos que conducen a la vida —en especial la vida inteligente— son considerados por este criterio improbables hasta el punto de excluir casi totalmente la existencia de vida extraterrestre.

Los investigadores partidarios de este último criterio aducen que la búsqueda de seres extraterrestres es insensata e injustifi-



cada y que la teoría de su existencia tiene demasiados puntos oscuros. Incluso las estrategias de la búsqueda contienen vaguedades adicionales, por lo que estos científicos concluyen que cualquier consumo de tiempo, esfuerzo o dinero dedicado a la búsqueda no está justificado a la vista de la escasa evidencia que poseemos.

Los partidarios de salir en busca de extraterrestres reconocen que las posibilidades de entrar en contacto con ellos son mínimas en el futuro inmediato, pero afirman que ahora es el momento de poner a prueba la hipótesis de que otras civilizaciones tecnológicas habitan nuestra Galaxia. No hacerlo equivale a cometer el error craso de los estudiosos prerrenacentistas: pensar sin probar experimentalmente.

Los ciudadanos de la Tierra se encuentran actualmente en el umbral de una posible admisión en la comunidad de civilizaciones galácticas, siempre que deseemos realmente ser miembros y a condición de que existan tales civilizaciones galácticas en las profundidades del espacio. Con ayuda de técnicas experimentales modernas como radiotelescopios, sondas espaciales y computadoras digitales, nuestra civilización ya es capaz de dar el siguiente gran salto evolutivo hacia delante: entrar en contacto con una vida inteligente extraterrestre.

Suponiendo que exista esta presencia galáctica, nos sería de enorme utilidad comunicarnos con ella. Después de todo, nuestra competencia tecnológica sólo se remonta a algunas décadas y hasta hace muy poco tiempo no hemos adquirido la capacidad de sostener un diálogo interestelar. Es muy posible que seamos la civilización inteligente más torpe de toda la Galaxia.

El descubrimiento de una vida galáctica avanzada nos aseguraría como mínimo que las civilizaciones tecnológicas tienen posibilidades de evitar el fin del mundo y sobrevivir.

Y, como máximo, al establecer un diálogo interestelar nuestra civilización puede alcanzar un elevadísimo nivel de conciencia jamás presentido desde que el hombre es hombre.

Con esto no queremos sugerir que el contacto en sí nos proporcionará una inteligencia instantánea, aunque podría ocurrir. Tampoco insinuamos que los extraterrestres nos facilitarán soluciones para nuestros problemas globales, aunque también podría ocurrir. Numerosos investigadores están sugiriendo ya que el mismo programa de la búsqueda dilatará nuestra imaginación, ensanchará nuestros horizontes y aumentará nuestra curiosidad. La propia búsqueda se convertirá en instrumento de supervivencia de la especie humana.

La característica que distingue a la raza humana es la exploración, un deseo innato, una sed insaciable de saber quiénes somos, de dónde venimos y a dónde vamos. Explorar significa observar, investigar, preguntar. Frenar la exploración en estos momentos sería actuar contra el mismo atributo que nos convierte en seres humanos. No llegar a habitar la materia próxima, o al menos a reconocer la materia remota, podría acabar prematuramente con el ansia exploratoria de la humanidad. De hecho, la longevidad tecnológica de la civilización podría ser corta sólo porque no emprendimos la colonización de planetas y la búsqueda de extraterrestres.

Merece la pena recordar una cosa: el espacio que nos rodea a todos puede estar ahora mismo inundado de señales de radio emitidas por civilizaciones extraterrestres. Si conociéramos la dirección y la frecuencia adecuadas, podríamos realizar el avance más prodigioso desde el nacimiento del lenguaje. El resultado no sería solamente todo un nuevo panorama en el estudio de la evolución de la materia y la vida, sino también la clave de la supervivencia de nuestra civilización.

Un esfuerzo internacional encaminado a la colonización planetaria y la búsqueda extraterrestre nos proporcionaría la estimulación y el espíritu competitivo necesarios para la supervivencia. Incrementaría nuestra curiosidad hasta límites insospechados. Y nos permitiría posponer, quizá indefinidamente, la sociedad reglamentada y totalitaria a la que ahora parecemos destinados.

Nuestra principal preocupación de los años venideros debe ser ésta: cuando una civilización tecnológica intenta repetidamente solucionar las numerosas crisis a nivel mundial que de manera inevitable amenazan a cualquier sociedad en evolución

y, al hacerlo, se precipita hacia el estancamiento mental y físico —la crisis que pone término a todas las crisis—, ¿hay tiempo suficiente para dispersarse por un sistema planetario y establecer un diálogo interestelar? Una evolución humana de esta magnitud ha requerido en el pasado decenas de miles de años, aunque existen precedentes de cambios importantes producidos en períodos de tiempo mucho más cortos: la transición de cazadores-recolectores a agricultores, y la de la sociedad feudal a la industrial. Es evidente que necesitaremos un enorme entusiasmo financiero y una gran participación social para mantener este doble proyecto de colonización y búsqueda durante decenios o incluso siglos.

Podemos haber evolucionado a partir de materia universal, pero nuestro futuro se halla casi exclusivamente en nuestras manos. ¿Somos lo bastante inteligentes para adaptarnos a esta alteración del panorama evolutivo? ¿Poseemos la inteligencia suficiente para asegurar la supervivencia de la humanidad? Nuestro destino será verdaderamente una medida de nuestra inteligencia actual.

EPÍLOGO

UNA ERA TOTALMENTE NUEVA



miles de millones de años

El proceso de la evolución cósmica es una invención humana. Pese a sus siete temas importantes, no nos fue revelada por medio de unas tablas de piedra.

La idea de que somos hijos del Universo no es nueva, sino que puede ser tan antigua como el primer *Homo* que se detuvo a contemplar la existencia.

Pero en las postrimerías del siglo XX podemos empezar a identificar conceptualmente algunos de los sutiles procesos astrofísicos y bioquímicos que nos permiten reconocer al Cosmos como origen y fuente de nuestra vida. Estos conocimientos se deben a muchas disciplinas, casi a todas las que pueden estudiarse en las universidades. Y, lo más importante de todo, muchas partes del gran panorama esbozado aquí han sido probadas recientemente por la ciencia experimental.

La evolución cósmica es una hipótesis a gran escala que se esfuerza por integrar lo grande y lo pequeño, lo cercano y lo distante, lo pasado y lo futuro en un todo unificado. Aunque siguen destacando algunos detalles clave, el marco global de la existencia, incluyendo su constante ciclo de radiación-materia-vida, resulta comprensible.

Examinemos una vez más esta gran panorámica. En la primera época del Universo la radiación dominaba a la materia. Durante esta Era de la Radiación, lo único que podía observarse era una luz intensa. Las ingentes cantidades de energía radiante produjeron una bola de fuego espectacularmente luminosa en cuyo interior no pudieron formarse átomos ni moléculas.

A medida que el Universo se expandía, también se enfriaba y diluía. La materia, evolucionada a partir de la radiación, empezó a aglomerarse en átomos y más tarde en cúmulos de átomos. De

hecho, un suceso de incomparable significación ocurrió cuando la materia empezó a aglomerarse, poco después de que el Universo se originara en un cegador remolino. La aparición de la materia como elemento dominante es la primera gran transformación de la historia universal. Este cambio fue fundamental, una parte absolutamente integral de la gran panorámica.

Desde el inicio de la Era de la Materia, ésta dominó a la radiación. Y la ha dominado desde entonces, formando sucesivamente galaxias, estrellas, planetas y vida.

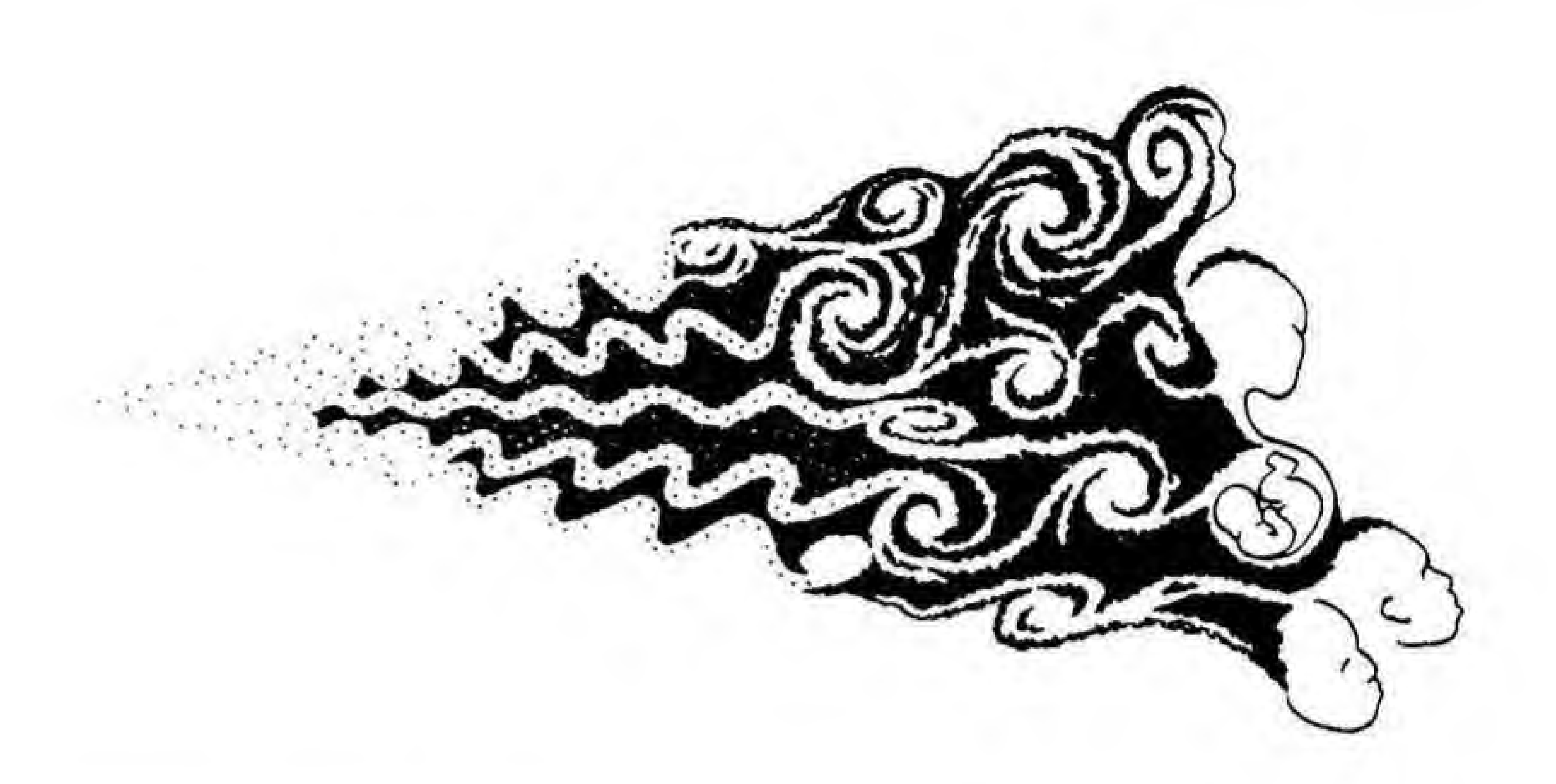
De todas las conglomeraciones de materia conocidas, las formas de vida son las más fascinantes, en especial las que pertenecen a civilizaciones tecnológicas avanzadas. La vida tecnológicamente inteligente difiere en esencia de las formas inferiores de vida y otros conglomerados de materia dispersos por todo el Universo no sólo en que es capaz de manipular la materia, sino también porque puede cambiar el curso de la evolución.

Si se le da el tiempo suficiente, incluso la evolución evoluciona.

Podemos tener la seguridad de que la evolución de los elementos continúa como siempre en los núcleos de todas las estrellas. La evolución química sigue produciéndose en lugares remotos, como en las nubes interestelares. La evolución biológica persiste en la mayoría de especies terrestres y posiblemente en otros planetas. Y la evolución cultural perdura en muchos rincones de nuestro mundo y tal vez en otros mundos lejanos. Pero en relación con la vida tecnológicamente inteligente, la evolución clásica parece haber experimentado un cambio fundamental.

La aparición de vida tecnológicamente inteligente, tanto en la Tierra como quizá en otros planetas, anuncia toda una nueva era: la Era de la Vida. ¿Por qué? Pues porque la tecnología permite a la vida iniciar el control de la materia, rivalizando con aquella transformación previa en que la materia empezó a separarse de la radiación hace más de diez mil millones de años. La materia está perdiendo su dominio total, aunque sólo sea en los puntos aislados donde reside la vida tecnológicamente inteligente.

La transición de la Era de la Materia a la Era de la Vida no será instantánea. Del mismo modo que la primera necesitó mucho tiempo para vencer a la radiación en los albores del Universo, también la vida requerirá un dilatado espacio de tiempo para superar a la materia. De hecho, la vida podría no llegar nunca a dominarla totalmente, bien porque las civilizaciones no consiguieran controlar los recursos materiales a una escala verdaderamente galáctica, o bien porque la longevidad de todas las civilizaciones tecnológicas fuera corta.



Aunque es posible que la Era de la Vida no alcance nunca la madurez, una cosa parece segura: los seres humanos del planeta Tierra, junto con cualquier otra forma de vida tecnológica existente en el Universo, estamos a punto de experimentar la lenta separación de la vida y la materia. Se trata de una transición de importancia astronómica, del amanecer de toda una nueva etapa de desarrollo cósmico.

La aparición de vida tecnológicamente inteligente como elemento dominante es la segunda gran transformación de la historia universal. Es el acontecimiento crucial en el desarrollo de la materia, al otro lado de cuyo umbral las formas de vida pueden empezar realmente a comprender su función en el Universo. Tenemos, pues, la obligación, la responsabilidad de sobrevivir. El gran experimento que representa la vida inteligente no debe acabar en un fracaso.

El ciclo está a punto de completarse. Ahora la vida contempla a la vida. Domina a la materia, reflexiona sobre nuestro origen y nuestro destino. Explora el sistema planetario que llamamos nuestra hornacina. Va en busca de vida extraterrestre. Persigue una comprensión nueva.

Durante el proceso, la vida descubre el significado, la relevancia de la evolución cósmica, un motivo subyacente del cambio universal. La vida reconoce que innumerables miles de millones de estrellas tuvieron que nacer y morir para crear la materia que ahora compone nuestro mundo. Nosotros mismos es-

tamos hechos de materia forjada en los núcleos de las estrellas y templada en el crisol de miles de millones de años de evolución... una especie de reencarnación cósmica. Además, hemos adquirido la inteligencia suficiente para reflexionar sobre el contenido material que nos dio la vida. Y encontramos, literalmente, que somos algo más que productos del Universo, algo más que vida *en* el cosmos. Somos agentes *del* Universo, agentes a quienes el Universo ha confiado la misión de investigar sobre él.

¿Deprimente? ¿Aterrador? Nada de eso. La evolución cósmica es maravillosamente cálida y esclarecedora al permitirnos aceptar nuestra herencia cósmica, hacer un uso más completo de nuestras potencialidades y emplear los medios con los cuales los seres conscientes, aquí y en otras partes, podremos en lo sucesivo desvelar los secretos de la naturaleza para perfeccionarnos a nosotros mismos y perfeccionar nuestro Universo.

A condición de que las civilizaciones continúen buscando nuevos conocimientos, a condición de que sean lo bastante inteligentes para sobrevivir, y a condición sobre todo de que sigan siendo intelectualmente inquietas, no es inconcebible que la vida pueda algún día evolucionar hasta el punto de dominar completamente a la materia, del mismo modo que la materia dominó a la radiación en el Universo primario. De hecho, el destino del Universo puede ser determinado no sólo por la materia, sino también por la vida que ha surgido de ella. Junto con nuestros vecinos galácticos, en caso de que existan, tal vez seamos al fin capaces de controlar los recursos de gran parte del Universo, remodelándolo para conseguir nuestros propósitos y asegurando así para nuestra civilización un sentido de inmortalidad.

«Somos hermanos de las rocas y primos de las nubes.»
Harlow Shapley, astrónomo
norteamericano del siglo XX




BRIAN SMITH



